INVESTIGACION y CIENCIA

ORIGEN Y EVOLUCION DEL SISTEMA INMUNITARIO

EL SECRETO DEL ACERO DE DAMASCO

EL FUTURO DE LOS COCHES ELECTRICOS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

AYER DE MARTE



ENERO 1997
800 PTAS.




Enero de 1997 Número 244

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Edward Bell

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Roberto Osti
5	Corbis-Bettmann
6	Tomo Narashima (*dibujos*); Laurie Grace
7	Roberto Osti
11	Roberto Osti
12-13	Dimitry Schidlovsky
14	Roberto Osti
15	Michael Sexton, *All Children's Hospital*
17-24	Antonio J. Criado y cols.
26	Richard E. Smalley (*arriba*), Joel M. Hawkins (*abajo*)
27	Laurie Grace
29	Paul Travers, Birkbeck College, (*arriba*); D. Schidlovsky (*abajo*)
30	Bryan Christie
44-45	Susan Kitchens (*vistas de Marte*); cortesía de Alfred McEwen y NASA (*mosaico global de Marte*); Slim Films (*efectos digitales*)
46-47	Edward Bell (abajo); Blyth Robertson, Estudio geológico de Canadá (*superior izquierda*); NASA (*superior derecha*)
48	Jeffrey S. Kargel
49	NASA
50	Cortesía del Laboratorio de Propulsión a Chorro
51	Bradford Washburn; cortesía de Panopticon Gallery (*arriba*); NASA (*abajo*)
52	Cortesía de Victor R. Baker (*arriba*); NASA (*abajo*)
54	Michael Goodman
55-60	Jared Schneidman Design; Michael Reck, Universidad de Innsbruck (*fotografía*)
63	Gamma Liaison
64	Michael Goodman
65	Johnny Johnson
66	Michael Goodman
67	Johnny Johnson
68-70	Yan Nascimbene
71	Yan Nascimbene (*gatos*); Jana Brening (*arriba*); Carol Donner (*abajo*)
72	Nin Berman, Sipa Press
74	Bennett A. Shaywitz *et al.*, Yale NMR Research
76-77	Jennifer Christiansen (*izquierda*); Roger de La Harpe, Anthony Bannister Photo Library (*derecha*)
78-79	Anne Solomon; Anthony Bannister ABPL (*abajo, centro*)
80	Anne Solomon (*arriba*); Roger de La Harpe, ABPL (*inf. izda.*); Anthony Bannister (*inf. dcha.*)
81	Anne Solomon
82-83	Anne Solomon; Roger de La Harpe; Anthony Bannister (*arriba*); Aron D. Mazel, Natal Museum (*abajo*)
84-85	Bryan Christie
87-89	Jennifer C. Christiansen
96	Nielsen Media Research (fotografías); Laurie Grace (*dibujos*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Origen de la inmunidad de los invertebrados*; J. M.ª Valderas Martínez: *Origen de la inmunidad de los vertebrados* y *Premios Nobel 1996 (Medicina)*; Manuel Puigcerver: *Premios Nobel 1996 (Química y Física)*; Mónica Murphy: *Cambio climático global en Marte*; Juan Pedro Campos: *Visión cuántica de la obscuridad*; J. M. García de la Mora: *Dislexia* y *Premios Nobel 1996 (Economía)*; Ana M.ª Rubio: *El arte rupestre del Africa meridional*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting y Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Glenn Zorpette; Marguerite Holloway, *Contributing Editor*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Empleando un tubo de transmisor de radar y una antena de bocina de radar, una insólita cocina, de nombre Radarange, cuece bollos y panes de jengibre en 29 segundos, ruste hamburguesas con cebolla en 35 segundos y asa salchichas de Frankfurt con su panecillo en diez segundos. El artefacto enfoca su haz de radiofrecuencia a las viandas a cocinar. Según la Raytheon Manufacturing Company, cuando termina la cocción, un cronómetro desconecta automáticamente la máquina y el alimento está listo para consumir.»

«Los ensayos de vibración son esenciales en los aviones y cohetes diseñados para rozar velocidades sónicas. El principio de la vibración resonante se está aplicando actualmente a los ensayos estructurales. Para ello, junto a la estructura que se somete a prueba, se colocan vibradores electrónicos, dispositivos similares a altavoces de radio. El elemento móvil de cada vibrador se conecta a una varilla metálica que se monta en una copa de succión de caucho adherida a la estructura. Basta con activar el vibrador a la frecuencia de vibración natural de la estructura para que, en cuestión de minutos, se generen fuerzas vibratorias tan intensas, que las vigas de hierro sujetas en bombarderos de dos y treinta toneladas hacen rebotar sus ruedas de aterrizaje».

«Resulta de veras asombroso descubrir los efectos que el olor puede causar en la clientela. Por ejemplo: la calcetería perfumada se vende con preferencia sobre la inodora, aunque, por extraño que parezca, una encuesta ha revelado que los compradores no se sienten conscientemente influenciados por el olor; imaginan que los artículos olorosos poseen una mejor textura o un color más atrayente.»

«Cuando los concejales de un municipio se deciden a gastar algún dinero de los contribuyentes en una nueva depuradora de aguas residuales o un sistema de abastecimiento de agua, en cabeza de la lista, o casi, hay un tipo de conducciones, hechas de amianto, fibras y cemento. Estas conducciones están libres de algunos tipos de corrosión y su lisura interna mantiene al máximo su capacidad de conducción al cabo de los años»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un invento que promete ser del mayor valor práctico para la telegrafía ha recibido su primer anuncio público de la mano del señor William H. Preece, experto en telegrafía de la administración postal londinense. Durante una conferencia acerca de "La telegrafía sin hilos", que se dio recientemente en Londres, Preece presentó a un joven italiano, un tal señor Marconi, quien, afirmó, había acudido a él recientemente para hablarle de su sistema. La telegrafía sin hilos no es, desde luego, una idea nueva. En 1893 se transmitían telegramas por inducción a una distancia de unos cinco kilómetros cruzando el Canal de Bristol. Pero el joven Marconi resolvió el problema fundamentándose en principios enteramente distintos; los funcionarios de correos llevaron a cabo un ensayo con pleno éxito en la Llanura de Salisbury sobre una distancia de 1,2 kilómetros.»

«Pisándole los talones a la hambruna llega la peste bubónica y hoy día la mitad de la población de Bombay ha huido de la ciudad. El aspecto de más interés para los europeos es saber si la enfermedad puede enraizar en latitudes septentrionales en el caso de que allí llegara la infección; por ahora no hay pruebas de tal cosa. El doctor Waldemar Haffkine, que está investigando la cuestión en Bombay, responsabiliza a ratas y hormigas de la propagación de la enfermedad. Las ratas portan la peste. Los roedores mueren y las hormigas se los comen y trasladan los gérmenes a las grietas de los edificios y a los grifos y sumideros de agua. De ese modo se difunde una ponzoña que sólo puede erradicar el fuego. Se dice que el doctor Haffkine ha demostrado la eficacia como antídoto de un virus atenuado de la enfermedad.»

«Nuestro grabado muestra el funcionamiento de un nuevo tipo de ascensor que están sometiendo a ensayo los administradores del puente de Brooklyn. Es un invento del señor Jesse W. Reno, quien, al objeto de presentarlo oficial y públicamente, instaló la misma máquina en Coney Island en septiembre pasado, donde transportó a más de 75.000 personas. El entarimado móvil tiene una pendiente de 25 grados y la altura sobre la horizontal es más de dos metros.»



Ascensor inclinado del puente de Brooklyn

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un puente de hierro, cuyo tamaño y magnificencia acaso no hayan sido igualados hasta ahora, está a punto de levantarse, con un viaducto que cruza el Tyne, desde Gateshead a Newcastle-upon-Tyne, para el ferrocarril de Newcastle y Berwick. Los contratistas deben preparar, suministrar y erigir todas las estructuras de hierro fundido o forjado o de madera para los puentes y sus accesos, de conformidad con los proyectos y bajo las instrucciones de Robert Stephenson, Esq.» [*Nota de la redacción: Inaugurado en 1849, el High Level Bridge todavía cruza el Tyne soportando tráfico de carretera y ferrocarril.*]

Origen de la inmunidad de los invertebrados

El sistema inmunitario, que en los mamíferos, hombre incluido, evidencia una exuberante complejidad, evolucionó a lo largo de cientos de millones de años por vías a veces sorprendentes

Gregory Beck y Gail S. Habicht

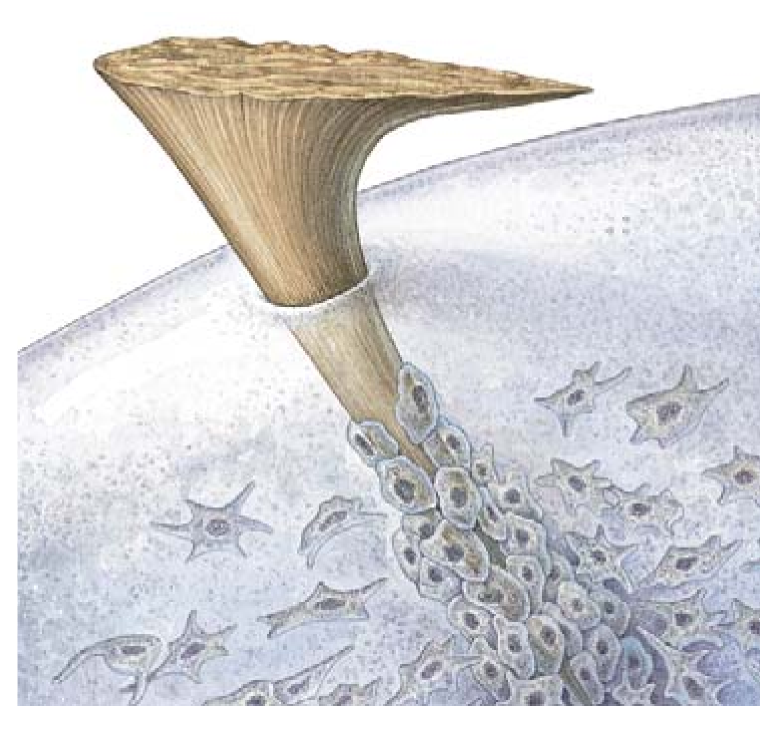
En diciembre de 1882, Elie Metchnikoff, zoólogo ruso, daba uno de sus habituales paseos por la playa siciliana de Messina. Tenía entonces 37 años. Pero aquel paseo no fue uno más, sino que traería consecuencias del máximo interés para la ciencia. Metchnikoff volvió a su casa de campo con una larva diminuta y transparente de estrella de mar común. La perforó con una espina de rosal. Cuando se dispuso a examinarla, la mañana siguiente, observó un racimo de células que recubrían la espina e intentaban absorberla.

Metchnikoff vio en seguida el significado de la situación: las células se aprestaban a defender a la larva mediante la digestión del invasor, en un proceso de fagocitosis. La ciencia sabía ya que se producía la fagocitosis cuando ciertas células humanas, especializadas, se encontraban con bacterias o levaduras. Metchnikoff vio más lejos, y entendió que ese proceso desempeñaba un papel mucho más amplio. La fagocitosis constituía un mecanismo fundamental mediante el cual los organismos de todo el reino animal se defendían contra las infecciones. Con semejante finura mental y toda una vida posterior de investigación, Metchnikoff creó la disciplina de la inmunología celular. Por su trabajo pionero en inmunidad celular, compartió el premio Nobel de medicina de 1908 con Paul Ehrlich, uno de los primeros en propugnar la importancia del otro componente fundamental de la defensa, la inmunidad humoral.

Por impresionante que fuera el logro de Metchnikoff, no fue ésta la mayor de sus realizaciones. Resultaba significativo que el sujeto de su experimento capital, la estrella de mar, fuera un animal que había permanecido casi inalterado desde su aparición, hacía al menos 600 millones de años. Después de hincarle el aguijón de la rosa, la estrella de mar exhibió un espectáculo que no hubiera diferido mucho de producirse en el océano primigenio del planeta decenas de millones de años *antes* de que aparecieran los primeros seres vivos con endoesqueleto óseo, los vertebrados.

Metchnikoff estaba convencido de ello. Sus investigaciones acabarían por demostrar que los sistemas de inmunodefensa (defensa del patrón) en todos los animales modernos tienen sus raíces en innumerables organismos que han poblado la Tierra desde que empezó la vida. Así nació otra disciplina científica: la inmunología comparada. Mediante el estudio de organismos diversos, algunos de ellos muy antiguos, los expertos en inmunología comparada nos acercan a la contemplación, desde una perspectiva singular, de uno de los frutos más complejos y maravillosos de la evolución: el sistema inmunitario del hombre y de otros mamíferos superiores. Pero la disciplina permite también ahondar en la naturaleza de la propia evolución: el hecho de que los invertebrados constituyan más del 90 por ciento

GREGORY BECK y GAIL S. HABICHT iniciaron su cooperación en 1989, cuando Beck realizaba sus cursos de doctorado y Habicht le dirigía la tesis en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Beck es ahora profesor de biología en la Universidad de Massachusetts en Boston; Habicht, vicepresidenta de investigación y profesora de patología en Stony Brook.



1. FAGOCITOS rodeando una espina de rosa con la que se ha pinchado la larva transparente de una estrella de mar. En 1882, el zoólogo ruso Elie Metchnikoff (*fotografía de la derecha*) observó este comportamiento, propio de una respuesta de inmunodefensa innata. Sus estudios subsiguientes establecieron el campo de la inmunología celular.

de todas las especies de la Tierra confirma la eficacia de sus mecanismos de inmunodefensa, que son claramente “primitivos”. Por si fuera poco, la inmunología comparada ha descubierto sustancias con función defensiva cuyo uso en los humanos parece prometedor.

El progreso reciente de nuestro conocimiento del sistema inmunitario, unido a los avances experimentados en el utillaje de la disciplina, han propiciado un período fecundo de la inmunología comparada, una segunda edad de oro, por así decirlo. Mediante el recurso a las herramientas moleculares y celulares desarrolladas en los últimos años, se ha amasado un impresionante cúmulo de conocimientos sobre los sistemas de inmunodefensa de animales tan dispares como estrellas de mar, insectos, tiburones y perros.

Cómo opera la inmunidad

Para apreciar en su cabal extensión todos los giros y derrotas que han tomado los sistemas inmunitarios a lo largo de cientos de millones de años, es necesario conocer cómo operan. La misión fundamental de cualquier sistema inmunitario estriba en distinguir las células, tejidos y órganos que son parte legítima del cuerpo del patrón, lo propio, de los elementos extraños, lo ajeno, que pudiera haber. A esa tarea le sigue otra importante: eliminar los invasores foráneos, que suelen ser bacterias o virus peligrosos. Además, el sistema inmunitario puede reconocer, y por lo general eliminar, “elementos propios alterados”, es decir, células o tejidos de su mismo cuerpo que han sufrido cambios por lesiones o enfermedades (cáncer, por ejemplo). La mayoría de los inmunólogos estaría de acuerdo en que el sistema inmunitario del hombre (y los de otros primates) posee los mecanismos más refinados de reconocimiento y eliminación de agentes invasores.

Considere el lector qué le sucede a una jardinera aficionada que se acaba de pinchar un dedo con un aguijón de rosal. A los pocos minutos, o inmediatamente después de que la sangre deje de fluir, el sistema inmunitario empieza a trabajar para eliminar a los microorganismos indeseables introducidos con la herida. En la escena hay ya (o no tardarán en llegar) macrófagos. Estos leucocitos no sólo rodean y destruyen a los microorganismos invasores, sino que también liberan proteínas que activan otras partes del sistema inmunitario y alertan a más fagocitos por si se requiere su intervención.

Esta rápida respuesta celular se denomina inmunidad natural o innata. Las células que la ejecutan se encuentran ya activas en el cuerpo antes de que aparezca un invasor. Todos los animales poseen un mecanismo defensivo de este tipo, que se cree que es la forma más antigua de inmunidad. Fue la inmunidad celular innata lo que Metchnikoff observó en la larva de estrella de mar.

Otro componente de la inmunidad innata es el complemento. Consta de una treintena larga de proteínas de la sangre. Estas proteínas operan de forma secuencial, en cascada, para identificar y destruir a los invasores. Por lo general, se basta la inmunidad innata para destruir a los microorganismos invasores; si no es así, los vertebrados cuentan con otra respuesta más: la inmunidad adquirida.

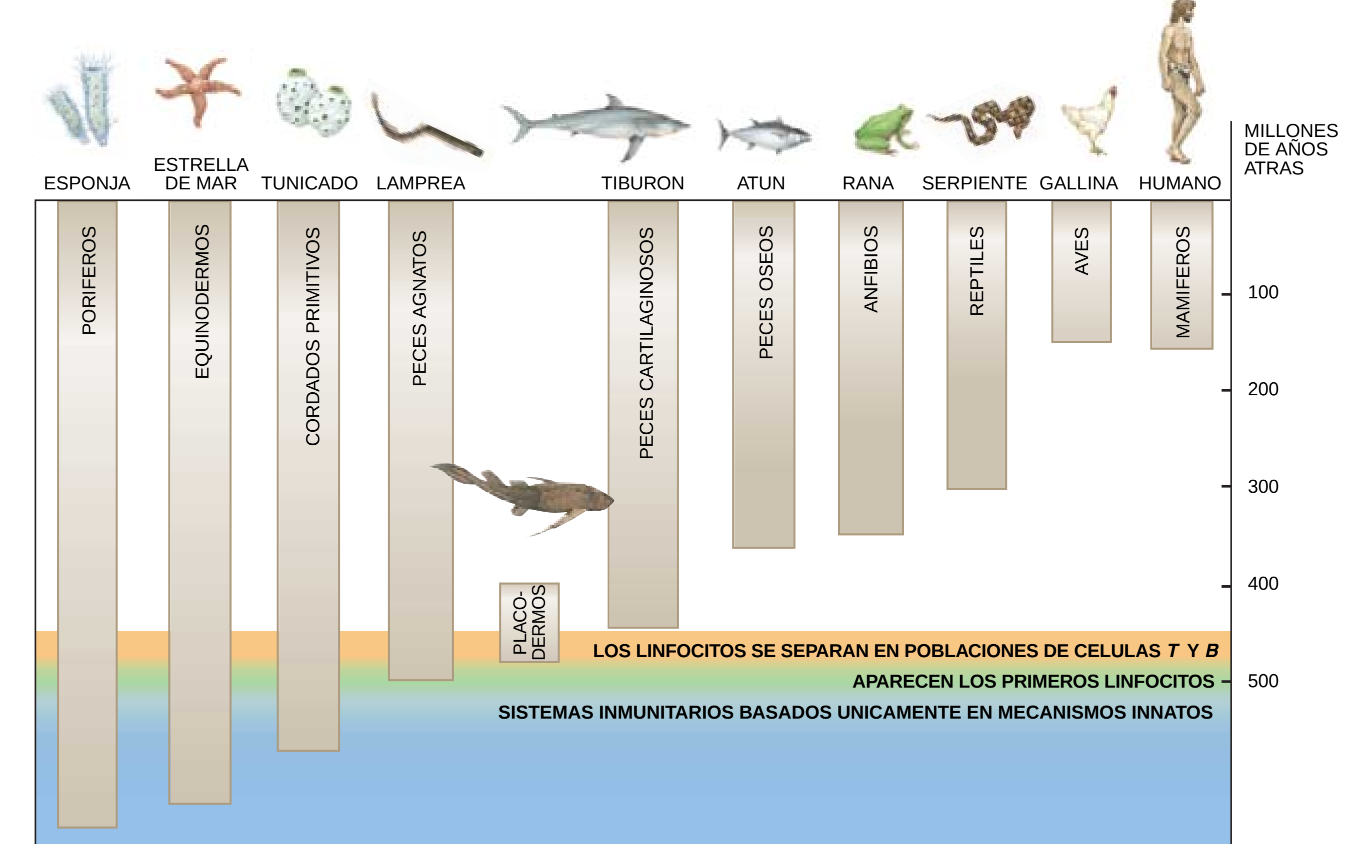
Los soldados de la inmunidad adquirida son ciertos glóbulos sanguíneos especializados, los linfocitos, que operan mancomunadamente, como un ejército. Desplazándose a través de la sangre y de los nódulos linfáticos, los linfocitos se hallan normalmente en reposo, pero se activan y se multiplican si encuentran antígenos, moléculas específicas y asociadas a organismos foráneos. Hay dos clases de linfocitos: *B* y *T*. Los linfocitos *B* segregan anticuerpos, proteínas defensivas que se fijan a los antígenos y facilitan su eliminación. El cuerpo humano contiene más de 100.000 millones de linfocitos *B*, cada uno de los cuales segrega un anticuerpo que difiere de la mayoría de los demás. Los linfocitos *T* cumplen varios objetivos: reconocen y matan las células que portan en su superficie moléculas consideradas ajenas. También ayudan a los linfocitos *B* en la síntesis de anticuerpos.

La inmunidad adquirida es muy eficaz. Se tarda, sin embargo, varios días en movilizarla, debido a la complejidad de la respuesta. El microorganismo invasor ha de entrar en contacto con los linfocitos *T* o *B* apropiados; se ha de promover la intervención de los macrófagos; deben dividirse los linfocitos activados; todos los leucocitos implicados han de sintetizar y liberar proteínas que refuercen la contundencia de la respuesta; las células *B* han de producir y liberar anticuerpos.

Pero la inmunidad adquirida posee también una peculiaridad singularísima, la memoria inmunológica, capacitada para abreviar la demora. La memoria inmunológica brota de mecanismos de origen génico que permiten que los linfocitos del cuerpo reconozcan la inmensa diversidad de antígenos, aun cuando cada linfocito reconoce un solo tipo de antígeno. En esencia, cada encuentro con un microorganismo invasor imprime una “plantilla” genética en determinadas células *B* y *T*. A la siguiente ocasión en que el mismo tipo de invasor salga al paso de estas células, utilizarán la plantilla, de suerte que la respuesta se producirá antes y con mayor contundencia que en la primera vez. En este fenómeno se apoyan las dosis de refuerzo, o inmunizaciones, que se administran a los niños. La jardinera del ejemplo podría, pasado cierto tiempo, olvidar su arañazo trivial, pero su sistema inmunitario jamás lo hará.

En el principio

Acabamos de exponer las dos clases principales de respuesta, la



2. HITOS INMUNOLOGICOS producidos por la época en que aparecieron los primeros animales con endoesqueleto óseo, los vertebrados. Entre esos sucesos cruciales destacó la aparición de los primeros sistemas inmunitarios que se fundan en linfocitos; debieron de protagonizarlo peces sin mandíbulas de hace unos 500 millones de años. Después, estos linfocitos se separaron en dos poblaciones distintas y discernibles en todos los vertebrados superiores. Los invertebrados poseen una familia de células que se parecen en algunos aspectos a las células inmunitarias de los vertebrados.

innata y la adquirida, del sistema inmunitario de los mamíferos y otros vertebrados superiores. La respuesta adquirida abarca, como singularidad significativa, la memoria inmunológica. En la respuesta desplegada intervienen muchos agentes distintos: macrófagos y otras células fagocíticas, linfocitos *B* y *T*, anticuerpos y una cohorte de proteínas participantes. ¿Cuáles de ellos (o similares) aparecen en otros grupos de organismos más antiguos? El averiguarlo constituye una de las tareas centrales de la inmunología comparada.

De los agentes mencionados, algunos se identifican ya en organismos remotos. La verdad es que ciertos componentes de la inmunidad se dejan ver en casi todos los seres vivos. (La fagocitosis es un ejemplo.) Algunos elementos perduraron eras enteras sin apenas sufrir cambios en la escala animal. Otros componentes, aunque exclusivos de los vertebrados superiores, presentan notabilísimas semejanzas con elementos de los sistemas de inmunodefensa de los invertebrados. Tales semejanzas revisten importancia, por cuanto dan a entender que los mecanismos de los invertebrados son precursores de los que vendrían después con los vertebrados. Tomadas en su conjunto, estas vinculaciones encierran la prueba más sólida de que los sistemas inmunitarios de los seres humanos y de otros mamíferos evolucionaron a partir de organismos más antiguos, en un intervalo de cientos de millones de años.

Hasta cierto punto obvio, los sistemas de defensa del patrón empezarían con las primeras formas de vida: con los protozoos, los animales más elementales. Los protozoos, que se remontan a unos 2500 millones de años, son formas de vida unicelulares; en otras palabras, llevan a cabo todas las funciones fisiológicas en una sola célula. La respiración, la digestión, la defensa y otras funciones se realizan, al menos en parte, mediante fagocitosis. En su función defensiva, la fagocitosis de los protozoos no difiere grandemente de la que acometen las células fagocíticas del cuerpo humano.

En la jerarquía animal que se eleva de las estrellas de mar a los seres humanos, las células fagocíticas se desplazan a través de un sistema circulatorio o (en el caso de las estrellas de mar) a través del celoma, una cavidad corporal llena de fluido. En las esponjas y otros animales pluricelulares que carecen de celoma y de sistema circulatorio, las células fagocíticas divagantes rondan por los tejidos y los espacios circundantes.

Hasta épocas muy tempranas de la historia de la vida se remonta también el otro pilar de la inmunidad, a saber, la capacidad de distinguir lo propio de lo ajeno. Ciertos protozoos viven en colonias de miles de individuos; forzosamente deben poder reconocerse entre sí. Es difícil admitir la posibilidad de vida colonial o la reproducción sexual sin suponer la capacidad de distinguir lo propio de lo ajeno. Entra dentro de lo razonable que los protozoos posean dicha facultad. Las mismas esponjas, que en opinión de algunos zoólogos son los metazoos (animales pluricelulares) más antiguos y simples, pueden distinguir lo propio de lo ajeno: sus células atacan los injertos que se les aplican de otras esponjas.

Sépase, sin embargo, que esa respuesta de rechazo no es idéntica a la que se observa en los vertebrados. En éstos, debido a la memoria in-

munológica, si se desecha el injerto de un donante, se rechazará con mayor prontitud un segundo injerto del mismo donante. Pero ni en las esponjas ni en las medusas el segundo rechazo tarda menos que el primero. De tales comprobaciones se extrae la idea de que les falta el componente de memoria de la respuesta inmunitaria, una piedra angular del sistema de los vertebrados. Conclusión que se ha corroborado en experimentos con estrellas de mar y otros invertebrados superiores, desprovistos, asimismo, de memoria inmunológica.

Carecen también los invertebrados de dos componentes más del sistema inmunitario de los vertebrados: el complemento y los linfocitos. Pero sí encierran, al parecer, entidades análogas. En lugar del complemento, determinados invertebrados (entre ellos: diversos insectos, cangrejos y gusanos) exhiben una respuesta similar, el sistema de la profenoloxidasa (proPO). Igual que el del complemento, el sistema proPO lo activa una serie de enzimas. Al final de una cascada de reacciones se llega a la conversión de proPO en la enzima activa fenoloxidasa, que interviene en la encapsulación de objetos extraños. Kenneth Söderhäll, de la Universidad de Uppsala, y Valerie J. Smith, de la Estación Marítima de Gatty, han demostrado que el sistema cumple además otras tareas, entre ellas la coagulación de la sangre y la eliminación de microorganismos.

Los invertebrados carecen de linfocitos y de un sistema inmunitario humoral de anticuerpos. Sí poseen, en cambio, mecanismos que parecen ser precursores de tales notas distintivas de la inmunidad de los vertebrados. Fijémonos en las lombrices de tierra, que aparecieron probablemente hace 500 millones de años. En ellas se han encontrado células parecidas a linfocitos. Y lo que quizás encierre mayor significado aún: todos los invertebrados sintetizan moléculas cuya operación se aproxima a la de los anticuerpos, cuyos precursores podrían ser. Estas moléculas las integran un grupo de proteínas denominadas lectinas. En las células, las lectinas pueden unirse a moléculas de azúcares; al hacerlo, las células se tornan pegajosas y se apelmazan. Las lectinas tuvieron que aparecer en una etapa precoz de la evolución, dada su presencia ubicua; se las encuentra en plantas, bacterias, invertebrados y vertebrados.

Ignoramos la función específica de las lectinas en la respuesta inmunitaria. Intervienen, tal parece, en la señalización de los organismos invasores, que están probablemente recubiertos de moléculas de azúcares diferentes. Se ha comprobado con lectinas aisladas de lombrices de tierra, caracoles, almejas y prácticamente todo tipo de animales invertebrados que esas proteínas participan en el recubrimiento de partículas extrañas, con lo que facilitan la fagocitosis. En cada *phylum* animal podemos observar numerosas lectinas con distinta especificidad por los glucósidos. Pensemos, por ejemplo, en las colectinas de vertebrados, un grupo de proteínas. Con ellas se hallan emparentadas las lectinas aisladas de la mosca de la carne *Sarcophaga peregrina* y de un erizo de mar. En el hombre, las colectinas cumplen una misión principal en la inmunidad innata: amén de activar el complemento o las células inmunitarias, recubren los microorganismos invasores para su pronta identificación por parte de los fagocitos.

Y aunque en los invertebrados no se encuentran anticuerpos, sí poseen moléculas que desde el punto de vista estructural e incluso funcional son similares. Los anticuerpos pertenecen a una familia de moléculas muy extensa y antigua, la superfamilia de las inmunoglobulinas. Todas las moléculas de este grupo poseen una estructura característica, el pliegue Ig. Desempeñan diversas funciones, pero en general se hallan implicadas en el reconocimiento de cuerpos extraños y de otros tipos de moléculas.

Probablemente, el pliegue Ig surgió durante la evolución de los metazoos, cuando se impuso el mutuo reconocimiento entre células diferenciadas. En su comienzo, el pliegue pudo haber sido una molécula de reconocimiento, implicada en la identificación de lo propio; con el tiempo, evolucionó hacia algo que podía reconocer también a los antígenos, preparando así el terreno para la aparición de las verdaderas inmunoglobulinas.

La hemolina, una proteína aislada de la sangre de polillas, pertenece a la superfamilia de las inmuno-

3. LA LIBERACION DE CITOQUINAS puede estimular muchas funciones, lo mismo en invertebrados que en vertebrados. Las misiones tienen que ver en buena medida con la defensa de la célula patrón. Recientemente, los autores encontraron que la citoquina interleucina-1 cumple funciones defensivas en la estrella de mar que son análogas o idénticas a las que realiza en los vertebrados.

globulinas. Se fija a las superficies microbianas y participa en su eliminación. Se han identificado otras superfamilias de moléculas en diversos invertebrados (saltamontes y moscas), así como en vertebrados inferiores. De lo precedente se infiere que las respuestas inmunitarias desplegadas mediante anticuerpos, aunque restringidas a los vertebrados, hunden sus raíces en los mecanismos de defensa de los invertebrados.

Precursor de la regulación inmunitaria

Diríase que la evolución no sólo ha conservado muchos aspectos de los mecanismos de inmunodefensa que surgen en los invertebrados, sino también muchas de las señales de control de dichos mecanismos. De un tiempo a esta parte hemos centrado nuestra investigación en el aislamiento de moléculas de invertebrados que guardan semejanza con las citoquinas de los vertebrados. Las citoquinas son proteínas liberadas por diversas células inmunitarias (y no inmunitarias), una vez activadas. Las citoquinas pueden estimular o inhibir a otras células del sistema inmunitario y, además, dejan sentir su influjo en órganos diversos. Entre estas proteínas se numeran los interferones, las interleucinas (IL-1, IL-6 y otras) y el factor de la necrosis tumoral (TNF), moléculas que son reguladores críticos de la inmunidad de los vertebrados.

Sospechábamos, apoyados en varios indicios, que los invertebrados habían de poseer la IL-1 o una citoquina ancestral similar. En primer lugar, estas moléculas regulan algunos de los mecanismos más primitivos de la inmunidad de los vertebrados. En segundo lugar, la estructura y las funciones defensivas de la IL-1 son similares en muchos vertebrados, lo que sugiere que las moléculas evolucionaron a partir de un precursor común. Por último, los macrófagos, el tipo de leucocitos que producen IL-1, tienen presencia ubicua en el reino animal.

A partir del flujo celómico de *Asterias forbesi*, una estrella de mar común en el Atlántico, aislamos cierta proteína de comportamiento similar al de la IL-1: sus propiedades físicas, químicas y biológicas eran las mismas; estimulaba las células de vertebrados que respondían a la IL-1; y los anticuerpos que reconocían a la IL-1 humana también reconocían a esta proteína. Más tarde descubriríamos que muchos invertebrados poseen moléculas emparentadas con las citoquinas de los vertebrados. Los gusanos y los tunicados (ascidias) contienen sustancias similares a la IL-1 y al TNF. Uno de los autores (Beck) ha encontrado moléculas parecidas a la IL-1 y a la IL-6 en el lepidóptero *Manduca sexta*. En resumidas cuentas, los invertebrados poseen equivalentes de las tres principales citoquinas de los vertebrados.

Las citoquinas de los invertebrados parecen desempeñar funciones semejantes a las de los vertebrados (*véase la figura 3*). A propósito de las estrellas de mar, hemos comprobado que sus celomocitos (células equivalentes de los macrófagos) producen IL-1. En experimentos realizados conjuntamente con Edwin L. Cooper, de la Universidad de California en Los Angeles, y David A. Raftos, ahora en la Universidad de Sydney, demostramos que la IL-1 estimulaba a estos equivalentes de los macrófagos para que acorralaran y destruyeran a los invasores. Todo indica, pues, que las citoquinas de los invertebrados templan buena parte de la respuesta defensiva de su patrón, a la manera de las citoquinas de los vertebrados, que orquestan la inmunidad innata.

Fármacos de rana

Pero la inmunología comparada no se limita a rastrear en los invertebrados los correspondientes análogos de las defensas de los vertebrados. Antes bien, la investigación originaria en invertebrados ha permitido descubrir tipos nuevos de defensas cuya presencia en los vertebrados sólo más tarde se pudo atestiguar.

Nos referimos, por ejemplo, a los péptidos y las proteínas antibacterianas, que son moléculas clave en la estrategia de defensa de los invertebrados. Dichas moléculas (algunas de las cuales ha convertido el hombre en medicinas eficaces) suelen ser liberadas por las células sanguíneas en las fases iniciales de la respuesta innata. La proteína antibacteriana de uso más extendido, aislada de invertebrados, es la lisozima. También fue la primera que se aisló. Los insectos producen lisozima cuando empieza la infección o cuando se ven expuestos a proteínas que conforman las paredes bacterianas. Pues bien, la lisozima se integra en la defensa innata de los seres humanos; en la saliva actúa para defender de las bacterias la cavidad oral.

En 1979, un grupo de la Universidad de Estocolmo dirigido por Hans

G. Boman descubrió péptidos que intervenían en la eliminación bacteriana de la polilla gigante de la seda, *Hyalophora cecropia*. Llamaron cecropinas a los péptidos en cuestión. Las cecropinas matan las bacterias, y lo hacen a concentraciones tan bajas que son inocuas para las células animales. Perforan la pared bacteriana y revientan así las células. No hace mucho se aislaban cinco tipos moleculares emparentados con las cecropinas en la parte superior del intestino del cerdo, donde ayudan a regular la flora bacteriana del tubo digestivo del suido. Hoy se están desarrollando ya para convertirlos en agentes antibacterianos de aplicación en humanos.

Jules A. Hoffmann y sus colegas, de la Unidad de Investigación del CNRS en Estrasburgo, han venido estudiando en insectos otro grupo de péptidos antibacterianos, las defensinas. Aisladas a partir de varios órdenes de insectos, da la impresión de que las defensinas constituyen el grupo más común de péptidos antibacterianos inducibles. Igual que las cecropinas, las defensinas son moléculas proteínicas bastante pequeñas; pero, a diferencia de lo que ocurre con aquéllas, no acabamos de conocer los mecanismos a través de los cuales las defensinas destruyen las bacterias. Las defensinas de los mamíferos, aunque asimismo pequeñas, no comparten gran cosa más con las defensinas de los insectos. De todo lo cual se infiere que los péptidos antibacterianos son pieza fundamental de la primera línea de defensa que el animal pone en inmediato despliegue.

También los vertebrados inferiores producen inmunodefensas peculiares. En 1987, Michael Zasloff, entonces en el norteamericano Instituto Nacional de la Salud, observó que las ranas de uñas africanas no precisaban antibióticos ni otros tratamientos para recuperarse completamente de cirugía no esterilizada, a pesar de que vivían en charcos plagados de bacterias. Buscando la causa de tan singular protección, aisló dos péptidos de la piel de la rana: magainina 1 y 2 ("Magainina" es castellanización del término hebreo para escudo). Los compuestos demostraron una amplia gama de actividades contra bacterias, hongos y protozoos. Los anticuerpos que se enlazan con la magainina también se fijan a células de los tejidos epiteliales humanos, como la piel y el revestimiento intestinal; este fenómeno sugiere que los seres humanos sintetizan moléculas similares para establecer la primera línea de defensa contra los patógenos.

Legado universal

El haberse descubierto originalmente en invertebrados los antibióticos peptídicos y otras estrategias singulares de inmunodefensa podría fomentar el estudio de curiosos sistemas de defensa que duermen entre los proyectos pendientes de la investigación inmunológica. ¿Cuántos compuestos que podrían salvar vidas quedan por descubrir?

Sorprende la escasa atención concedida a los sistemas de inmunodefensa de los invertebrados, cuando tales estudios pueden compensarnos de múltiples maneras. Empezamos a enterarnos de funciones defensivas que caracterizan a todos los seres vivos. Al ahondar en el conocimiento de sistemas de organismos antiguos y que fueron nuestros antepasados entendemos mejor los procesos de sus descendientes en el curso de la evolución.

En puridad, las complejidades de la respuesta inmunitaria de los vertebrados sólo podrán comprenderse por entero mediante el análisis de sistemas más elementales, los propios de los invertebrados. El alcance de esa línea de investigación no sólo se deja sentir en el desciframiento de la evolución, sino también en la resolución de problemas más inmediatos de la salud y la enfermedad humanas. En esta y otras empresas, el legado de Metchnikoff es universal.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CELL-FREE IMMUNITY IN INSECTS. H. G. Boman y D. Hultmark en *Annual Review of Microorganismology*, vol. 41, págs. 103-126; 1987.

PRIMITIVE CYTOKINES: HARBINGERS OF VERTEBRATE DEFENSE. G. Beck y G. S. Habicht en *Immunology Today*, vol. 12, n.º 3, págs. 180-183; junio 1991.

INSECT DEFENSINS: INDUCIBLE ANTIBACTERIAL PEPTIDES. Jules A. Hoffman y C. Hetru en *Immunology Today*, vol. 13, n.º 10, págs. 411-415; octubre 1992.

PRIMORDIAL IMMUNITY: FOUNDATIONS FOR THE VERTEBRATE IMMUNE SYSTEM. Coordinado por G. Beck, E. L. Cooper, G. S. Habicht y J. J. Marchalonis. Número especial de *Annals of the New York Academy of Sciences*, volumen 712; 31 de marzo, 1994.

Origen de la inmunidad de los vertebrados

Los tiburones, con más de 450 millones de años de existencia, son un reflejo de un período lejano en la evolución del sistema inmunitario

Gary W. Litman

Hace unos quinientos millones de años, el antepasado de todos los vertebrados mandibulados surgió en las calientes aguas del inmenso océano primigenio de la Tierra. Su naturaleza está rodeada de misterio, pero algunos paleontólogos creen que este ser se parecía mucho a un grupo de peces de aparición posterior y que se conocen como placodermos. Tenemos noticia de su existencia, al menos, por los restos fósiles que dejaron. Estas torpes criaturas tenían la cabeza y la región pectoral recubiertas por placas óseas protectoras y parece que, en algunos casos, pudieron alcanzar los siete metros de longitud.

Dar con un ejemplar vivo de placodermo o de cualquiera de los predecesores de los vertebrados representaría una importante contribución a nuestra comprensión de la evolución. Pero tal vez revestiría aún mayor interés si pudiéramos estudiar el funcionamiento de uno de los componentes más complejos de nuestro organismo: el sistema inmunitario. Apareció poco después de que ciertos vertebrados amandibulados protagonizaran la transición crítica hacia la forma mandibulada. Este tránsito es un momento clave en la evolución, pues constituye un hito en el camino que conduce a los animales más avanzados, incluidos los que andando el tiempo se arrastraron hasta tierra firme y de cuya posterior evolución surgieron los humanos. Es muy verosímil que el sistema inmunitario adaptativo, multicomponente, apareciera con los primeros vertebrados. Los sistemas inmunitarios de los invertebrados de nuestros días, muy similares a los que caracterizaban a los extintos, carecen de la notable capacidad adaptativa que distingue a la inmunidad del mundo vertebrado.

Si bien los placodermos y sus predecesores desaparecieron tiempo ha, contamos con un óptimo sustituto: varios de sus parientes filogenéticos, como son los tiburones, las quimeras o las rayas. Estos peces —cuyos sistemas inmunitarios apenas si deben de haber cambiado poco desde su aparición hace cientos de millones de años— nos permiten asomarnos a un período remoto y fecundo de la evolución.

En los últimos años, he investigado con mis colaboradores el sistema inmunitario de algunos de estos organismos. Como era de esperar, la inmunidad de estos fósiles vivientes difiere de la de otros animales que llegaron después: ranas, monos o humanos, por ejemplo. Mas, para nuestra sorpresa, en lo que se refiere a la capacidad de proteger al patrón frente a distintas patologías, como las infecciosas, tales sistemas inmunitarios añosos resultan no menos eficaces (si no más) que sus homólogos modernos.

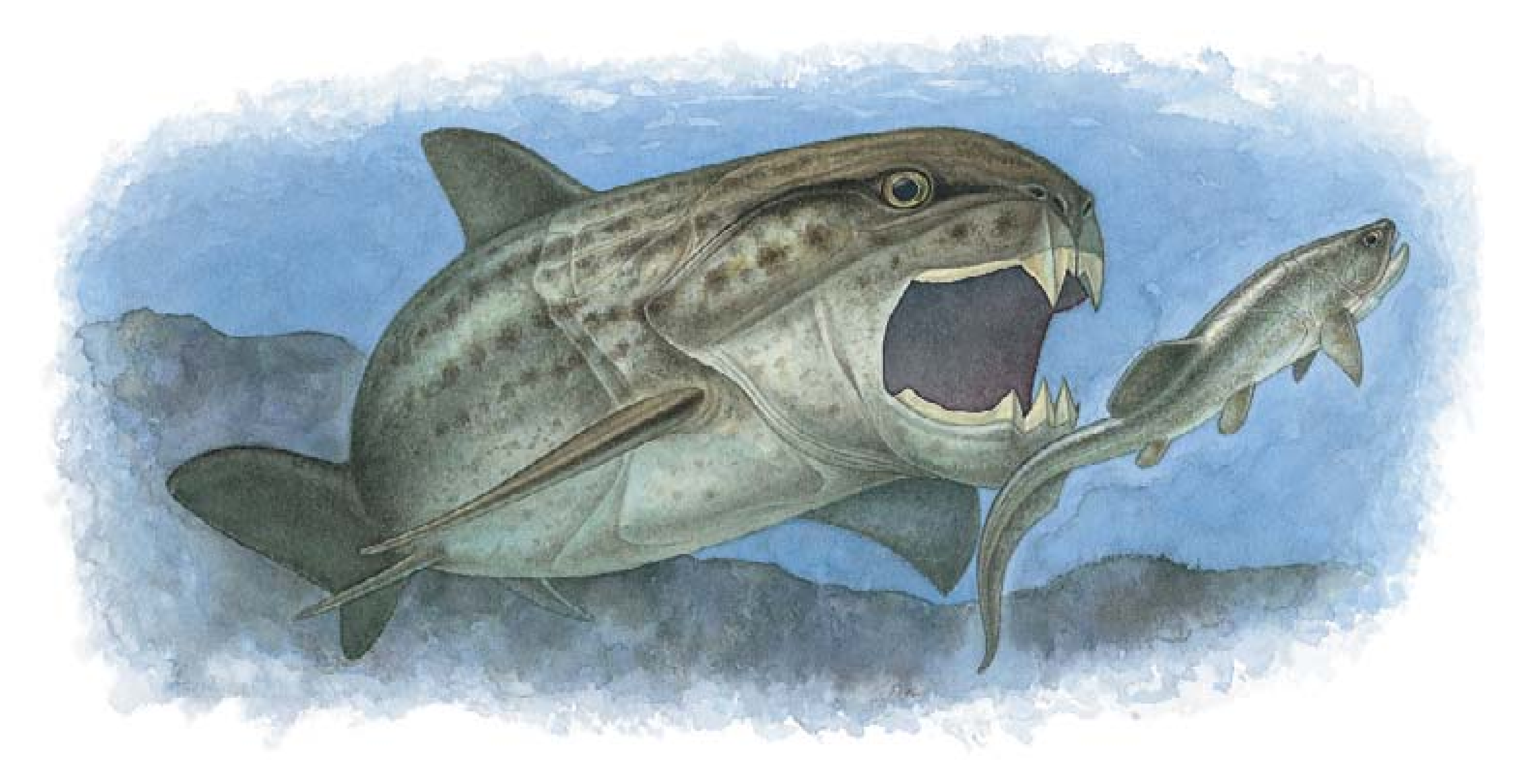
Quizá no debiera ello extrañarnos. La subclase de los elasmobranquios, en la que se incluyen tiburones y rayas, existe desde hace más de 450 millones de años (*Homo sapiens* sólo cuenta con medio millón de años) y ha sobrevivido a extinciones generalizadas que acabaron con un sinfín de especies. Resulta difícil concebir semejante éxito evolutivo en seres que no tuvieran un sistema inmunitario de extraordinaria eficacia. Los esfuerzos que empeñamos en la identificación de las características de un sistema inmunitario que determina semejante éxito evolutivo han traído un efecto colateral beneficioso: una mejor comprensión de la inmunidad humana.

GARY W. LITMAN, profesor de la cátedra Hines de pediatría, enseña bioquímica y biología molecular en la facultad de medicina de la Universidad de Florida del Sur. Dirige la división de genética molecular del Hospital Pediátrico de San Petersburgo. Autor de 187 publicaciones y revisiones generales, ha recibido recientemente el premio Merit de la rama de alergias y enfermedades infecciosas del Instituto Nacional de la Salud. El autor desea agradecer la colaboración de Chris Amemiya, Michele K. Anderson, Martin F. Flajnik, Carl Luer, Jonathan P. Rast y Michael J. Shamblott en la redacción del artículo.

Las dos partes de la inmunidad

En el sistema inmunitario adaptativo se distinguen dos partes fundamentales: la humoral y la celular. Los agentes implicados en la inmunidad humoral se conocen como linfocitos *B* o células *B*. Las células *B* producen moléculas proteicas, o anticuerpos, que en el torrente circulatorio se unen a los antígenos (sustancias extrañas al huésped) de virus y bacterias potencialmente dañinos. Guiadas por ese engarce, otras entidades somáticas se servirán de diversos mecanismos para destruir virus y bacterias por distintos mecanismos. A los anticuerpos se les llama también inmunoglobulinas; los humanos poseen cinco clases principales.

Todos los anticuerpos de una misma célula *B* son de la misma clase y se unen a un antígeno específico. Si este anticuerpo encuentra a su correspondiente antígeno y se une a él, se activa la célula *B* productora de este anticuerpo y se potencia la síntesis y secreción de dicha proteína. La mayoría de los miles de millones de células *B* de nuestro cuerpo producen anticuerpos distintos entre sí.



1. SE CREE QUE LOS PLACODERMOS, de los que sólo quedan restos fósiles, fueron unos de los primeros en beneficiarse de un sistema inmunitario adaptativo y polimorfo.

Durante la formación de cada célula *B* tiene lugar un proceso en el que intervienen elementos heredados y aleatorios y que programa a la célula para producir en abundancia un "receptor" único; este receptor es la porción de anticuerpo que propiamente se traba con el antígeno. Merced a tan ingente diversidad de receptores de antígenos, la inmunidad humoral posee un amplísimo registro.

La inmunidad celular corre a cargo de un grupo distinto de células inmunitarias, los linfocitos *T* o células *T*. A diferencia de las células *B*, las células *T* no producen anticuerpos. Los linfocitos *T* reconocen los antígenos que se encuentran ligados a cierto tipo de moléculas instaladas en la superficie de una clase diferente de células. Cuentan para ello con moléculas especializadas, con receptores. El rechazo de un injerto de piel heterólogo o la destrucción selectiva de células tumorales son algunos ejemplos de los fenómenos típicos de la actuación de los linfocitos *T*.

Inmunoglobulinas y receptores de las células *T* son los medios primordiales de los que se vale el organismo para reconocer antígenos específicos. A pesar de que la inmunidad humoral y la celular presentan diferencias básicas en cuanto a sus funciones y objetivos, una y otra interaccionan en la respuesta inmunitaria. Las células *T*, por ejemplo, intervienen en la regulación de la función de las células *B*.

En algunos aspectos, la inmunidad de ráyidos y tiburones es parecida a la de los humanos. Estos peces presentan bazo, que, como en los humanos, es una importante fuente de células *B*. Durante el proceso de inmunización de un tiburón —tras inyectarle un antígeno—, las células *B* reaccionan produciendo anticuerpos. Las semejanzas se extienden también a la inmunidad celular. Al igual que los humanos, los tiburones y los ráyidos poseen timo, órgano en el que maduran las células *T* y del que parten. En las células *T* de los tiburones también se han identificado receptores.

En investigaciones que realicé con Jonathan P. Rast, hoy en el Instituto de Tecnología de California, llegamos a la demostración de que la diversidad de estos receptores brotaba, al igual que en humanos, del mismo tipo de mecanismos genéticos que originaban la diversidad de anticuerpos. Una última analogía la constituye la reacción frente a los injertos de piel: un injerto procedente de otro tiburón será rechazado por el huésped.

No obstante estas semejanzas, existen algunas diferencias fascinantes y significativas entre el sistema inmunitario de los peces cartilaginosos, así el tiburón, y los humanos. Los peces cartilaginosos presentan cuatro clases de inmunoglobulinas, de las cuales sólo una, la IgM, se encuentra en los humanos. Aún más, estos anticuerpos de los tiburones carecen de la exquisita especificidad que permite, entre otras cosas, el reconocimiento de las sutiles diferencias que existen entre dos tipos parecidos de bacterias.

Además, a diferencia de los anticuerpos humanos, estos anticuerpos carecen de la capacidad de unirse al antígeno con una afinidad creciente en el curso de una respuesta inmunitaria prolongada, lo que no deja de constituir una clara ventaja a la hora de hacer frente a una infección. En el rechazo de un injerto de piel tenemos una muestra de las divergencias relativas a la inmunidad celular: los tiburones no rechazan un injerto con la rapidez y energía de los humanos; antes bien, necesitan varias semanas.

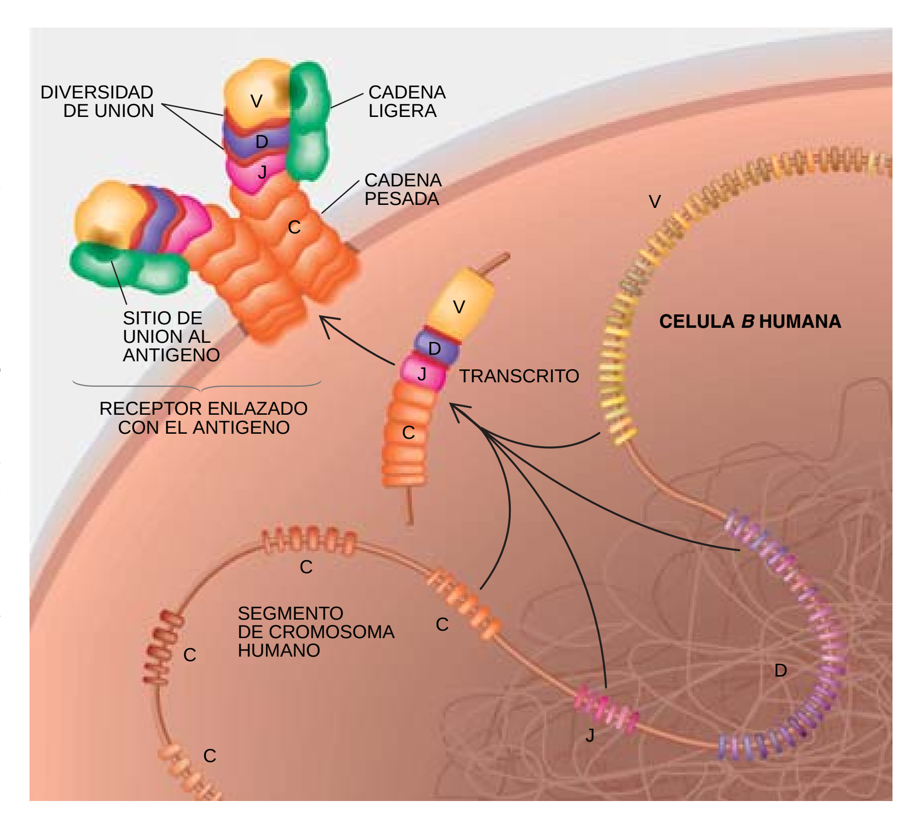
¿Significa esto que el sistema inmunitario de tiburones y ráyidos es menos adecuado para las necesidades del organismo que el de humanos y de otros mamíferos? En absoluto. La naturaleza idiosincrásica de ese sistema inmunitario antiguo ilustra óptimamente los quiebros y giros que se sucedieron en el curso evolutivo de la inmunidad. Esa trayectoria sinuosa, al menos en lo que concierne al sistema propiamente dicho, sugiere que la evolución no ha seguido el camino lineal e inexorable con que se suele presentar.

Para cada antígeno, un receptor

Nuestros estudios se han centrado en la parte humoral del sistema inmunitario del tiburón cornudo, un pez moteado que suele alcanzar el medio metro de longitud. En este animal, al igual que en todos los vertebrados, la diversidad de los receptores de antígenos se fundamenta en la constitución genética. Cada receptor de antígeno de la inmunoglobulina está formado por interacciones entre dos cadenas de aminoácidos, la pesada y la ligera. Con pocas excepciones, la inmunoglobulina básica presenta dos pares de tales cadenas y, por tanto, dos sitios de unión al antígeno. Con qué antígeno exactamente se trabará un receptor dependerá del tipo y ordenación de los aminoácidos en las cadenas que forman el receptor.

Con independencia del punto corporal de su síntesis, las cadenas de aminoácidos se forman en las células y están especificadas por genes del núcleo celular, que actúan a la manera de plantillas. En el caso de los receptores de antígeno, las cadenas de aminoácidos están especificadas por segmentos de genes del núcleo de las células *B*, también conocidos como genes de inmunoglobulinas. Existen tres tipos de tales segmentos génicos: V (de variabilidad), D (de diversidad) y J (de unión, “joining” en inglés). La secuencia de aminoácidos de la cadena pesada viene determinada por los tres tipos de segmentos génicos; la ligera, en cambio, está codificada sólo por segmentos V y J. Un cuarto tipo de segmento génico, el C (de constancia), determina la clase de anticuerpo.

En el ser humano los segmentos funcionales V, D, J y C residen en un mismo cromosoma. Igual que en la mayoría de los vertebrados superiores, también en los humanos los segmentos aparecen en agregados, por dar un ejemplo, de 50 elementos funcionales V, 30 D, seis J y ocho C en una misma localización, lo que viene a significar la ocupación de un millón aproximado de “peldaños” de la “escalera“ del ADN molecular. (Estos peldaños son los pares de bases.) Cuando el mecanismo de lectura de genes de una célula *B* acomete la síntesis de un anticuerpo, intervienen diversos metabolitos celulares que empiezan por recombinar los segmentos V, D y J adyacentes a un segmento C, en un proceso dividido en distintas etapas. La información genética se transmite luego a los sistemas celulares de proteosíntesis. La recombinación de estos segmentos génicos determina las características del enlace del anticuerpo con el antígeno. En los humanos, la conjunción de distintos elementos V, D y J, que recibe la denominación de diversidad combinatoria, constituye un factor importante en la generación de diversidad de los receptores de antígeno.



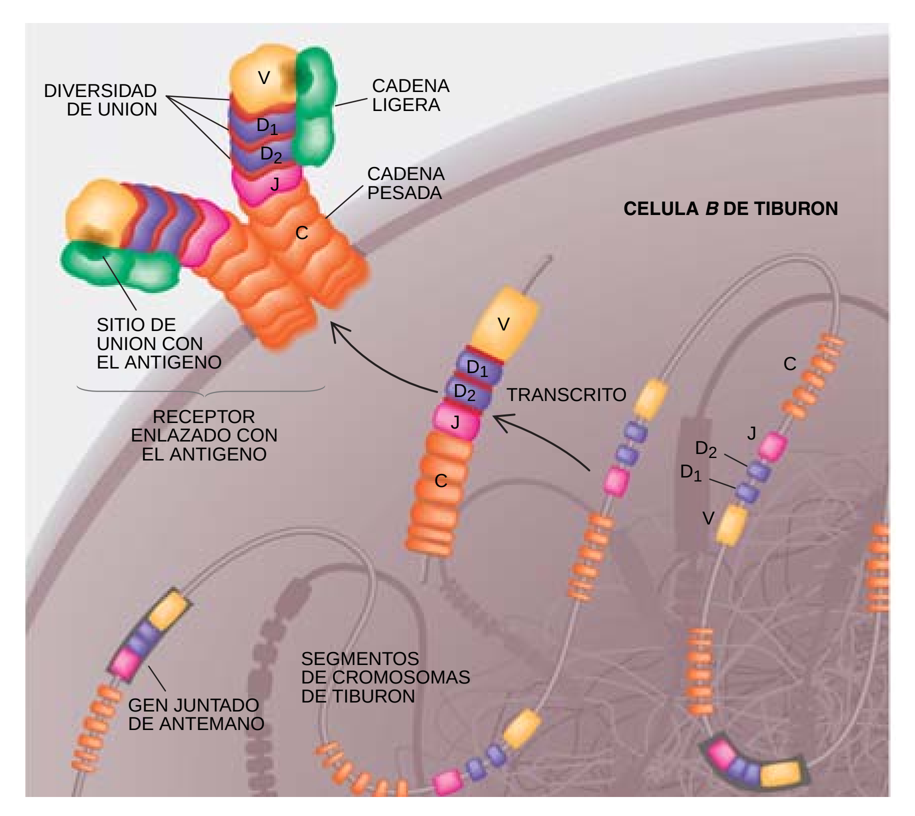
2. **GENES CODIFICADORES de anticuerpos en el sistema inmunitario del hombre y en el del tiburón. Presentan diferencias sorprendentes en lo que se refiere a la disposición de los segmentos génicos que se recombinan para especificar un receptor engarzante de un antígeno. Se muestra aquí una versión simplificada del proceso que especifica la molécula de cadena pesada, un componente del receptor de antígeno. El receptor es una parte de la macromolécula del anticuerpo conocido como IgM; ésta alberga cinco de**

En los tiburones los segmentos de genes de inmunoglobulinas también se organizan en agregados. Pero en esos peces el agregado de genes de cadena pesada contiene sólo un segmento V, dos segmentos D, un J y un C. Existen más de cien agregados de ésos, repartidos por varios cromosomas del tiburón. Cuando la maquinaria encargada de la síntesis de proteínas de una célula *B* de tiburón produce un anticuerpo sólo se recombinan los cuatro segmentos génicos (V, D1, D2 y J) procedentes de un mismo y único agregado (el segmento C ya se ha unido al segmento J). Como sucede en los mamíferos, una vez leído el mensaje genético se traduce en una proteína que formará un receptor de antígeno.

¿Hemos de considerar que la recombinación exclusiva de los segmentos V, D1, D2 y J de un agregado de genes condiciona la capacidad del sistema inmunitario del tiburón para producir una amplia diversidad de receptores de antígeno? Podría ser así, sin duda, de no haber cientos de agregados de genes de anticuerpos, repartidos en distintos cromosomas del tiburón. Además, ni la inmunidad de los mamíferos ni la de los tiburones dependen exclusivamente de la diversidad combinatoria para generar muchos anticuerpos distintos. En los tiburones y otros peces cartilaginosos importan dos nuevos fenómenos a la hora de potenciar la diversidad. Se conocen como diversidad de unión y diversidad heredada.

¿Cuál es el origen de la diversidad?

Para entender la diversidad de unión hemos de retrotraernos a la conjunción de los segmentos V, D y J que especifica la cadena del receptor de antígeno. Se habla de diversidad de unión cuando se juntan, por ejemplo, segmentos V y D



tales receptores. Se trata, además, del único anticuerpo que tienen en común humanos y tiburones. En aquéllos, los segmentos génicos que convergen para especificar el receptor se encuentran dispersos a lo largo de un cromosoma. En los tiburones los segmentos génicos están ya reunidos en una especie de empaquetamiento que se puede encontrar en varios cromosomas distintos. Por mor de simplificación se han omitido los detalles de las distintas fases del proceso de transcripción.

o D y J. Antes de que tenga lugar la fusión real de los extremos por los que se unen ambos segmentos, se eliminan varios pares de bases del ADN de la región fronteriza y se añaden nuevas bases de forma aleatoria. En virtud de esa alteración local del material genético, cambia la secuencia de los aminoácidos y, con ella, las características del receptor de antígeno correspondiente.

Aquí reside la ventaja del segmento D adicional que aparece en el sistema productor de anticuerpos del tiburón. Con cuatro segmentos génicos diferentes se obtienen tres sitios donde puede tener lugar la diversidad: entre V y D1, entre D1 y D2, y entre D2 y J. Gracias al fenómeno de la diversidad de unión, se pueden crear, a partir de cada agregado de genes, millones de variantes de una misma molécula de anticuerpo, dotada cada una de estructuras de receptor ligeramente dispares. En los mamíferos, por contra, la diversidad de unión sólo puede darse en dos sitios: entre los segmentos V y D y entre D y J. Por consiguiente, la diversidad de unión promueve en los mamíferos una variabilidad menor.

Tamaña capacidad para generar muchos anticuerpos distintos resulta, en principio, muy atractiva cuando se trata de proteger a un organismo contra un vasto espectro de invasores extraños. Pero media todo un abismo, fatal en potencia, entre la capacidad para generar diversidad de anticuerpos y el aprovechamiento eficaz de esa misma diversidad. Sabido eso, la diversidad de unión se torna una espada de doble filo. En teoría, puede generar suficientes anticuerpos específicos para hacer frente a cualquier situación. Pero, en pocas palabras, podría tardarse demasiado tiempo en producir una cantidad suficiente de anticuerpos, seleccionar los mejores, multiplicar su número y enfrentarlos a los invasores; en breve, el huésped podría perder su lid contra el agente infeccioso.

Para evitar la derrota, el organismo dispone de ciertos mecanismos que seleccionan con rapidez la "plantilla" del gen del anticuerpo cuya acción se requiere sin demora. La expresión inmediata de esta plantilla corre a cargo de una célula *B* del organismo, entre miles de millones. En los mamíferos, y con ese mismo objetivo, ciertos compartimentos celulares especializados y complejas comunicaciones intercelulares se encargan de activar el sistema inmunitario y extender su alcance.

Los tiburones cuentan sobre todo con una forma de diversidad heredada. Se trata del proceso más genuino de su sistema inmunitario. Gracias al mismo, no tienen que depender de un suceso azaroso —la combinación fortuita de pares de bases de ADN alcanzada a través de la diversidad de unión— para sintetizar el receptor idóneo en el momento preciso. En el tiburón, se hereda un alto porcentaje de agregados de genes de cada célula con sus segmentos V, D1, D2 y J total o parcialmente "juntados de antemano".

En estos agregados, la capacidad de producir diversidad de unión es, si no nula, limitada. El análisis de cientos de estos agregados de genes total o parcialmente "juntados de antemano" ha demostrado que sus segmentos génicos guardan un estrecho parecido con los segmentos de agregados habituales. Fenómeno que induce a pensar que un tipo derivó del otro en algún momento de la evolución.

Pero, ¿por qué? Como en tantas otras áreas, nuestro conocimiento de los mecanismos genéticos ha avanzado mucho más que el desciframiento de su relación con la función desempeñada. De todas maneras, parece totalmente razonable imaginar que la parte humoral del sistema inmunitario de los peces cartilaginosos ha evolucionado hasta combinar lo mejor de las dos posibilidades: un gran número de genes que pueden recombinarse y proporcionan por tanto flexibilidad inmunitaria, y algunos genes de especificidad fija que pueden movilizarse con prontitud para generar anticuerpos contra los patógenos a los que estas especies acostumbran enfrentarse.

La combinatoria, la de unión y la heredada, no agota todas las formas de diversidad que pueden darse. En efecto, los dos tipos aludidos de agregados de genes sufren, además, mutaciones, cambios éstos que, en los vertebrados superiores, se producen con altísima frecuencia en los genes codificadores de anticuerpos. Las mutaciones alteran las peculiaridades de los receptores de antígeno de los anticuerpos.

De la comparación de la inmunidad humoral en humanos y en tiburones resulta una conclusión del mayor interés: las moléculas de los anticuerpos han sufrido cambios rela-

tivamente pequeños en 450 millones de años. La estructura proteínica de los anticuerpos del tiburón y del hombre es muy parecida. Las propias secuencias V, D y J de los segmentos génicos que especifican la formación de los anticuerpos son similares. Lo que sí alteró la evolución de manera radical fue la organización de estos segmentos génicos que especifican la formación de los anticuerpos. En los tiburones, por ejemplo, la evolución primó la diversidad de unión y, sobre todo, la diversidad heredada. Pese a su relativa sencillez, los mecanismos de diversificación genética del sistema inmunitario de los tiburones parecen, en muchos aspectos, más eficientes que los de los humanos.

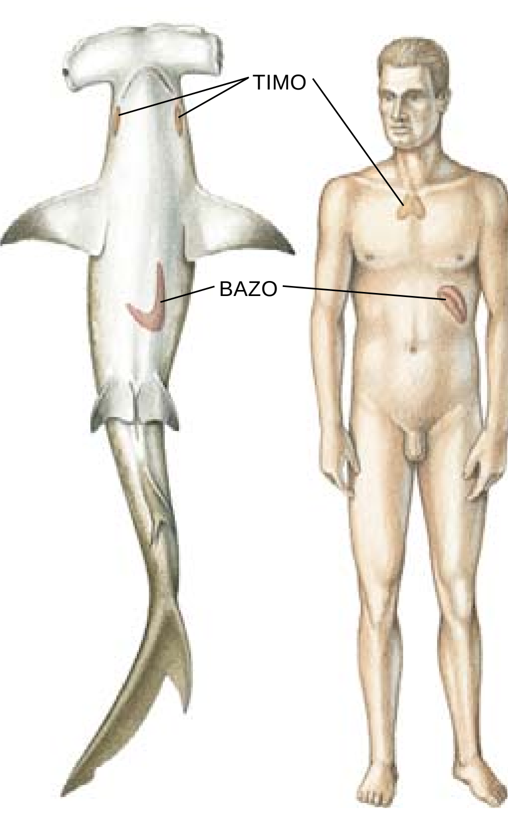
No puede asombrarnos que estos estudios confirmen que la evolución adapta de forma excepcional los sistemas a las necesidades inmediatas del organismo. Pero, en lo que se refiere a la inmunidad, la evolución tiene también que hacer frente a desafíos inesperados. Lo que sí resulta sorprendente es que, para lograrlo, se produzcan saltos evolutivos aparentemente enigmáticos y de magnitud desacostumbrada en períodos cortos, al menos en la inmunidad humoral.

Inmunidad celular

Muchos de los principios que hemos venido describiendo —la reordenación de segmentos génicos espaciados y dispersos por el cromosoma y la lectura y alteración de la información genética para la creación de receptores de antígeno constituidos por cadenas de aminoácidos— sirven lo mismo para la inmunidad celular que para la humoral. Después de todo, las células *T*, al igual que los anticuerpos secretados por las células *B*, tienen que reconocer y trabarse a una gama casi ilimitada de antígenos.

Células *T* y anticuerpos poseen receptores, cifrados por segmentos génicos similares. Los mecanismos básicos de la reordenación de segmentos génicos que producen las moléculas de inmunoglobulinas crean también los receptores de las células *T*. Pero el receptor de célula *T* se encuentra sólo en la superficie celular y únicamente reconoce los antígenos que estén unidos a una molécula especializada sobre otra célula diferente. La afinidad de las células *T* por los antígenos es baja si se compara con la de algunos anticuerpos. Tampoco experimentan las tasas de mutación que sufren los anticuerpos.

En el pasado, muchos inmunólogos creyeron que la inmunidad celular precedió a la humoral. Ahora bien, la naturaleza crónica del rechazo de un injerto de piel en los tiburones sugería que en éstos la inmunidad celular no era consistente y carece, posiblemente, de especificidad, concediendo que ejerciera alguna acción. En justa coherencia, varios observadores rechazaron que los tiburones posean células *T*.



3. TIBURONES Y HUMANOS comparten una serie de propiedades inmunitarias. Ambos tienen timo y bazo.

Para someter a prueba esta hipótesis, mis colegas y yo decidimos determinar si el tiburón cornudo tenía o no células *T*. La demostración irrefutable de la existencia de células *T* requiere la identificación de sus receptores de antígeno. No nos servían los métodos al uso. Pero disponíamos de la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), técnica capaz de producir millones de copias de un fragmento de ADN. Usamos una versión de la técnica de la RCP en el marco de un proceso que produjo un gran número de genes codificadores de receptores de células *T*, lo que facilitaría su caracterización. Por fin logramos hallar en las rayas las cuatro clases de receptores de antígeno propias de las células *T* de los mamíferos; también encontramos pruebas que abonan su presencia en el tiburón.

La caracterización pormenorizada de una de las clases de receptores de células *T* de los tiburones nos reveló que entrañaba una compleja diversidad, pareja a la de su contrapartida humana. Nos sorprendió la coincidencia. Revelaba que, a diferencia de la organización de los genes que cifran anticuerpos, los genes que determinan receptores de células *T* no han sufrido cambios importantes desde hace 450 millones de años, cuando los tiburones se separaron de la línea evolutiva que había de llevar a los mamíferos. El sistema de genes codificadores de anticuerpos y el de los genes de receptores de antígeno podrían haber derivado de un antepasado común que se asemejara mucho más al último. Aunque podría también aducirse lo contrario: habría existido un antepasado del estilo gen de anticuerpo a partir del cual surgieron ambas categorías de sistemas génicos.

Conforme avanza la caracterización del genoma de los tiburones y sus parientes cercanos, van apareciendo agregados de genes. Así, el grupo que lidera Martin F. Flajnik, de la Universidad de Miami, ha observado la presencia de agregados de genes que recuerdan a los genes de anticuerpos y a los genes de receptores de antígeno. No menos llamativo: los genes de estos agregados experimentan una tasa altísima de mutaciones.

Otros trabajos en curso insinúan la posibilidad de que, a lo largo del curso evolutivo, genes del sistema inmunitario procedentes de distintos agregados se hayan mezclado y solapado entre sí. Con cientos de agregados y un recambio genético ilimitado, el intercambio entre agregados pudo convertirse en un procedimiento muy rentable de generar nuevos agregados de genes. Cabe esperar que la prosecución de las investigaciones se vea recompensada con el descubrimiento de otros receptores del sistema inmunitario del tiburón.

Por lo que concierne al intercambio entre agregados en el tiburón, podemos considerar ahora bajo una nueva luz la peculiar redundancia observada en los agregados de genes codificadores de receptores del



4. LOS TIBURONES CORNUDOS se numeran entre los organismos más antiguos en los que se ha conseguido identificar de manera inequívoca la presencia de células *T*, los agentes de la inmunidad celular.

sistema inmunitario: la agrupación de segmentos V, D1, D2 y J, esencialmente idénticos y repetidos una y otra vez en diversos cromosomas. En pocas palabras, esta recombinación, junto con otros rasgos exclusivos de la genética del tiburón, aporta los medios para la rápida evolución de nuevas familias de moléculas de receptor. En los mamíferos, los segmentos de genes están confinados en un solo cromosoma y no se aprecia redundancia estructural. De ello se infiere que las posibilidades de ese tipo de recombinación son remotas.

Todavía más. Según parece, la duplicación de segmentos de genes —la existencia de múltiples V, D o J, un logro del sistema inmunitario de los mamíferos— se ha conseguido a costa de introducir y mantener un número significativo de elementos genéticos carentes de función. En los tiburones y las ráyidos, por otra parte, son infrecuentes los elementos no funcionales y, probablemente, no tardan en eliminarse del genoma.

Como supervivientes de una línea evolutiva muy antigua, quizá sean tiburones y ráyidos el único eslabón que nos una con los orígenes lejanos de la inmunidad de células *T* y *B*. Estos peces son un reflejo de un momento singular en el curso de la evolución. A través de la ventana que representan puede que algún día veamos los elementos que dirigieron la evolución de un sistema que es, en muchos sentidos, tan protector, o más, que las placas acorazadas de los placodermos que se fueron.

Si leyéramos como debiéramos lo escrito en el registro evolutivo, no dejaríamos de plantear varias cuestiones. ¿Cuál fue la despiadada naturaleza del desafío lanzado por los patógenos que obligó a cambios radicales en la organización de los genes codificadores de anticuerpos? ¿Acaso sugiere esa enseñanza ofrecida por los vertebrados prehistóricos e indican las profundas diferencias observadas en los mamíferos contemporáneos que el sistema inmunitario está preparado para sufrir cambios rápidos? Si ésa fuera la doctrina a extraer, tendríamos que replantearnos las ideas aceptadas sobre selección y adaptación evolutivas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVOLUTION OF THE IMMUNE SYSTEM. Louis DuPasquier en *Fundamental Immunology*. Tercera edición. Dirigido por William E. Paul. Raven Press, 1993.

RECONOCIMIENTO INMUNITARIO DE CUERPOS EXTRAÑOS. Charles A. Janeway, Jr., en *Investigación y Ciencia*, páginas 26-33, noviembre, 1993.

PHYLOGENETIC DIVERSIFICATION OF IMMUNOGLOBULIN GENES AND THE ANTIBODY REPERTOIRE. Gary W. Litman, Jonathan P. Rast, Michael J. Shamblott *et al*. en *Molecular Biology and Evolution*, vol. 10, n.º 1, págs. 60-72, enero, 1993.

MOLECULAR EVOLUTION OF THE VERTEBRATE IMMUNE SYSTEM. Simona Bartl, David Baltimore e Irving L. Weissman en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volumen 91, n.º 23, págs. 10769-10770, 8 de noviembre, 1994.

El secreto del acero de Damasco

El acero de Damasco ha mantenido oculto su secreto hasta el siglo XX. *Sus magníficas propiedades se derivan de su alto contenido en carbono, de la baja temperatura de forja en caliente y de la operación de temple*

Antonio J. Criado, Juan A. Martínez, Rafael Calabrés y Daniel Arias

El acero de Damasco, que atemorizó y fascinó a los europeos desde la Edad Media, mantuvo oculto su secreto hasta nuestro siglo. Su dureza y poder cortante los debía a su alto contenido en carbono y a los tratamientos de forja en caliente y de temple. Las espadas fabricadas con este acero resultaron insuperables.

Los europeos conocieron la eficacia de esas armas en las Cruzadas, de cuya primera expedición se cumplen ahora nueve siglos. Los cruzados conquistaron Jerusalén el 15 de julio de 1099. Comenzó entonces una etapa que duraría aproximadamente dos siglos y que terminó con la pérdida de San Juan de Acre en 1291. De esta época derivó la fama y el nombre del acero de Damasco. En vano los herreros europeos se esforzaron en reproducir sus excelentes propiedades mecánicas y su bello aspecto mate cruzado por multitud de finas líneas serpenteantes.

Pero esas armas ya habían sido admiradas antes. Carlomagno heredó la espada Joyosa de su padre Pipino el Breve, quien a su vez, con toda probabilidad, la recibió de Carlos Martel, que se la arrebató a Abderramán al-Gafeki en la batalla de Poitiers (732). Merecen las alabanzas del poeta en el *Cantar de Roldán*: "...Magníficas, claras y blancas, centelleantes, notables por su filo, y tienen la mejor de las hojas, templadas en la sangre de los combates o en la de los enemigos..." Dice también: "...Joyosa, de la cual no hubo par. Esta espada muda de reflejos treinta veces al día..." Por otra parte, en el poema de *Beowulf* se habla del "...hierro donde jugaban unas vetas venenosas...", refiriéndose, con toda probabilidad, al hermoso aspecto del acero de Damasco.

El Cid, antes de ser Campeador, utilizó una espada sarracena que perteneció a Mudarra González para vengar a su padre. Ya Campeador, tuvo dos espadas famosas: Colada, "la templada por la sangre de los enemigos" y arrebatada al conde de Barcelona, y Tizona, "la ardiente o la rabiosa", tomada al emir Búcar de Marruecos. La espada Tizona puede contemplarse en el Museo del Ejército de Madrid; su condición actual presenta restauraciones en la hoja de acero y una empuñadura sustitución de la original sarracena, realizada durante el reinado de los Reyes Católicos.

El descubrimiento del secreto del acero de Damasco supuso un reto de siglos para la ciencia occidental. Hasta la segunda mitad del siglo XIX, con la aparición de los procesos Bessemer y Siemens-Martin de afino del acero, no decayó el interés por un material que se consideró único por sus propiedades mecánicas y su belleza. La imposibilidad técnica y el desarrollo de nuevos aceros relegó la investigación del secreto.

Pero se habían dado ya pasos firmes hacia su desentrañamiento. René-Antoine Ferchault Réaumur (1683-1757) propuso que lo que endurecía al acero era algo que contenía en exceso el arrabio, como las sales y el azufre. Tobern Olof Bergman (1735-1784), más acertado, intuyó que era la interacción del carbono en el hierro la causante de las propiedades del acero; hecho asegurado por Joseph Priestley en 1786. Michael Faraday, en 1819, y Jean Robert Breant, dos años después, propusieron que la notable resistencia, tenacidad y fuerza del acero de Damasco dependían de su alto contenido en carbono.

En nuestro laboratorio de tecnología mecánica de la Universidad Complutense, abordamos el problema apoyados en técnicas de análisis. Una parte de nuestra investigación persigue reproducir el acero de Damasco, tanto en lo que se refiere a la obtención del material base, como a la recuperación de las antiguas técnicas de forja y temple. Entendiéndose la forja como una operación necesaria para la conformación plástica por deformación en caliente, a base de golpes, que provoca la trituración de las estructuras cristalinas indeseables de la solidificación y dando la forma a la pieza. Con el temple, consistente en un enfriamiento rápido desde alta temperatura, se obtienen estructuras muy firmes y duras que aumentan la resistencia del producto forjado.

Para las operaciones de forja contamos con la colaboración de Juan Pozón, maestro herrero de Cerro Muriano (Córdoba), quien se ocupa de reproducir diversos ejemplares de armas con este acero al estilo tradicional, siguiendo las recetas mágicas y legendarias y bajo la dirección de los autores de esta investigación. El acero base se obtiene en nuestro laboratorio modificando aceros comerciales.

La fabricación de las antiguas espadas de Damasco presenta dos etapas diferenciadas: la obtención del acero de alto contenido en carbono (1,4-2 %

ANTONIO J. CRIADO, JUAN A. MARTÍNEZ, RAFAEL CALABRÉS y DANIEL ARIAS conforman el Grupo de Investigación de Tecnología Mecánica de la Universidad Complutense de Madrid. Criado y Martínez son profesores del departamento de ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica de la facultad de ciencias químicas. Calabrés y Arias realizan su tesis doctoral.

C en peso) y los tratamientos termomecánicos para su conformación.

La materia prima de este acero la forman los *wootz*, cuya fabricación se conocía en el Oriente preislámico. Su comercio se extendió por el mundo musulmán, en forma de piezas moldeadas con la morfología del crisol en que se fabricaban, o de pastillas, de apenas diez o quince centímetros de diámetro. Muy posiblemente este acero se correspondía con el metal que Jabir ibn Hayyan, alquimista del siglo IX, denominaba *khar sini* o "barba de chino", dado su aspecto, y que él incluía en su lista de cuerpos metálicos: plomo, estaño, oro, plata, cobre, hierro y *kahr sini*.

El proceso de obtención de los *wootz* pasa por reducir las menas de hierro, que son óxidos de hasta un setenta por ciento de contenido en el metal para el caso de la magnetita y el oligisto. La reducción de estos minerales se llevaba a cabo en hornos de mampostería, mezclando el mineral triturado con carbón vegetal en capas alternas. La combustión del conjunto permitía liberar el hierro del oxígeno a partir del monóxido de carbono, formado a la elevada temperatura conseguida en el interior del recinto cerrado. La temperatura alcanzada, y el ambiente más o menos reductor, determinan el tipo de hierro obtenido. Un horno de poca altura y ambiente poco reductor, muy aireado, produce una pella de hierro esponjosa, que no llega a fundir durante el proceso, retiene multitud de impurezas y posee un contenido en carbono muy bajo. Esta pella, que se extrae de la parte inmediatamente inferior a la zona de soplado de las toberas, se golpea en caliente para triturar y expulsar las impurezas. Se provoca la soldadura por forja de la masa esponjosa. Así se obtiene un lingote de hierro de gran pureza, aunque con algunas inclusiones de escorias.

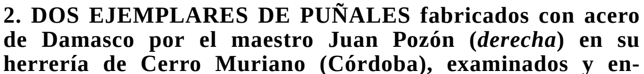
Si se trabaja con hornos de más altura y ambiente muy reductor —exceso de carbono— se consigue un hierro fundido con un contenido muy alto en carbono, es decir, entre el dos y el seis por ciento en peso. Con estos contenidos en carbono, las temperaturas alcanzadas por combustión del carbón vegetal —de algo más de 1300 ºC— bastan para producir la fusión del metal, ya que se forma un eutéctico de bajo punto de fusión llamado ledeburita (1147 ºC). (Denomínase eutéctico la mezcla de dos sólidos cuya fusión se realiza a temperatura constante.)

Para obtener los *wootz*, había que carburar el hierro forjado o decarburar la fundición hasta el contenido adecuado, situado entre el 1,4 y el 2 % en peso de carbono. En el primer caso, se mezclaban pequeñas piezas de hierro con carbón vegetal, procedente de maderas de muy bajo contenido en azufre, en un crisol de arcilla refractaria sellado





1. ESPADAS fabricadas con acero de Damasco, pertenecientes al Museo del Ejército de Madrid. A la izquierda, "Tizona", la preferida del Cid Campeador y que fue arrebatada al emir Búcar de Marruecos. A la derecha, un bello sable de acero de Damasco de mediados del siglo XV, recientemente estudiado y restaurado por los autores.



2. DOS EJEMPLARES DE PUÑALES fabricados con acero de Damasco por el maestro Juan Pozón (*derecha*) en su herrería de Cerro Muriano (Córdoba), examinados y ensayados en el laboratorio de tecnología mecánica de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Complutense de Madrid.

herméticamente; luego se calentaba a unos 1200-1400 grados Celsius. Un característico chapoteo anunciaba que parte del contenido se había licuado, indicio de un aumento del contenido de carbono en el hierro, lo que provocaba la aparición de una proporción de aleación líquida de composición eutéctica (ledeburita). El enfriamiento lento homogeneizaba la aleación por difusión del carbono a través del hierro, obteniéndose un acero de contenido muy próximo al 2 %, con un tamaño muy grande de los cristales de hierro: los granos de austenita.

En el segundo caso, partiendo de fundición, la decarburación se llevaba a cabo oxidando superficialmente la aleación en estado fundido en un crisol de arcilla refractaria. El proceso podía acelerarse mediante el rascado de la superficie para retirar la cascarilla de óxido y así facilitar el acceso del oxígeno del aire al metal fresco. Además de la oxidación superficial del metal se producía la eliminación de carbono por formación del dióxido de éste, que sigue accediendo a la superficie mientras el proceso oxidativo a alta temperatura esté en marcha. La disminución de la presencia de este elemento en la fundición provoca la solidificación paulatina, continuándose la operación en estado sólido. De esta manera se rebaja el contenido en carbono hasta la proporción adecuada. Un enfriamiento muy lento permite homogeneizar el carbono y hace crecer los granos de austenita.

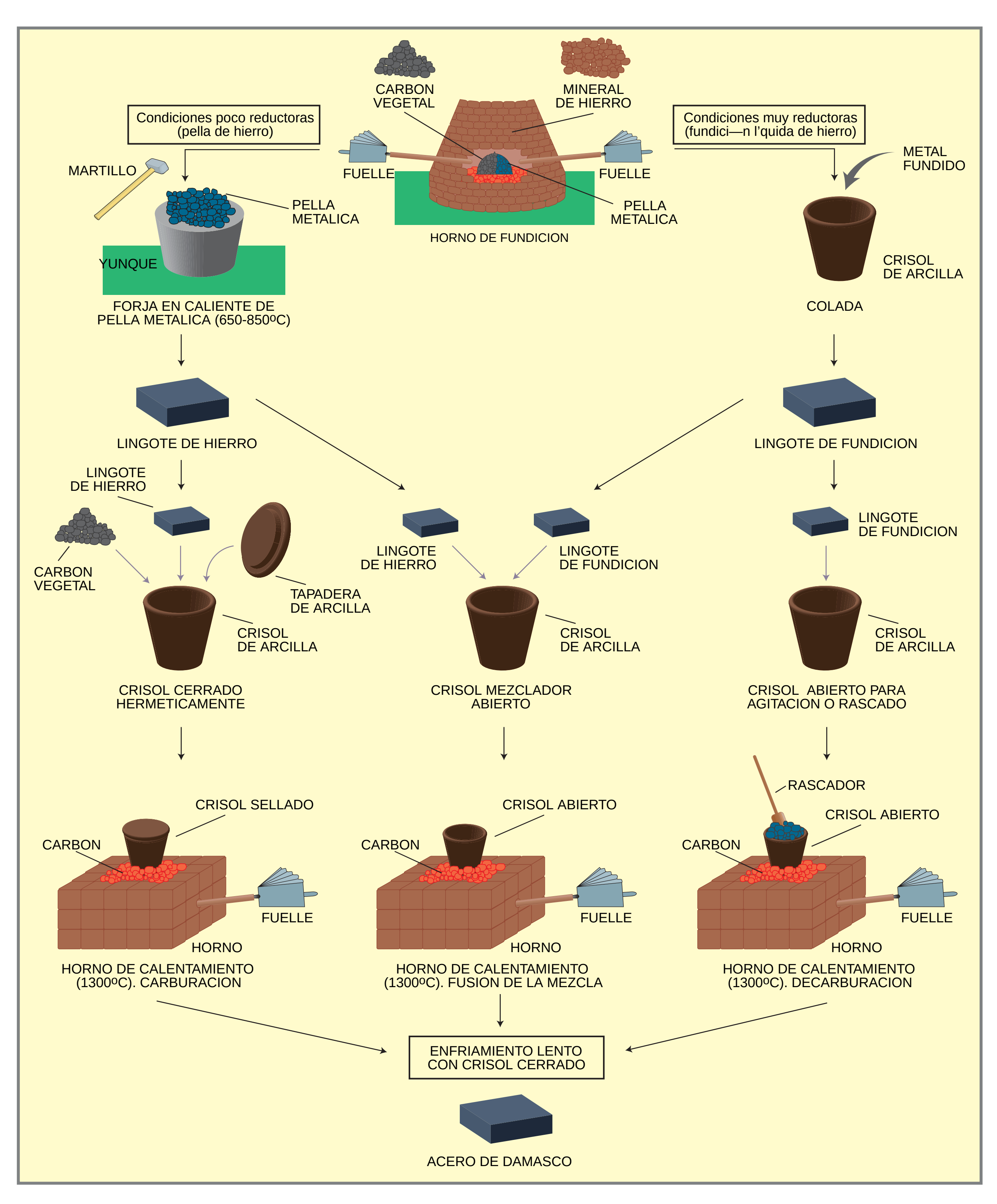
El descubrimiento y estudio de la fundición de Tieshenggou, en Gougxian (China), ilustran sobre las diferentes técnicas utilizadas. Este centro de producción, del cual ya se han excavado 2000 m^2, mantuvo su actividad desde mediados de la dinastía de los Han hasta la época de Wang Mang. Más de dos milenios después, Pier Martin y Friedrich Siemens desarrollaron, en 1868, su proceso para la obtención de grandes cantidades de acero por fusión de mezcla de fundición y de hierro dulce, algo que ya se hacía en la instalación china del primer milenio a. C., lo que demuestra el dominio de la técnica del acero en Oriente.

Por tanto, un tercer proceso para llegar a la obtención del acero de Damasco consistiría en mezclar, en proporción adecuada, hierro dulce y fundición. Un reciente hallazgo arqueológico realizado en Sri Lanka por Gill Juleff demuestra la utilización de hornos en los que la aireación estaba controlada: obtenían hierro fundido del que posteriormente, por carburación, decarburación o mezcla, se llegaba hasta aceros de alto contenido en carbono y gran calidad.

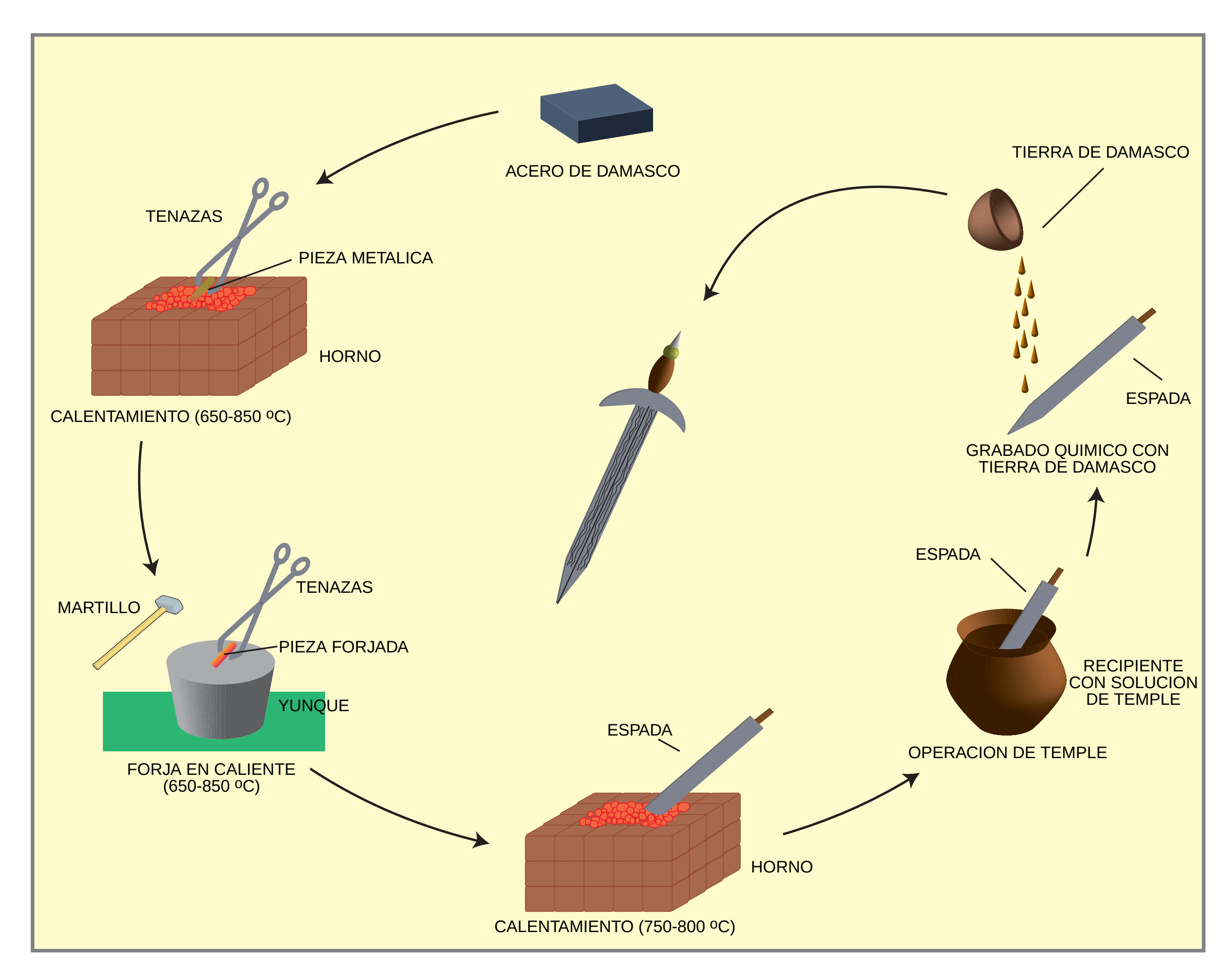
Obtenido el acero base, se procede a fabricar la espada. Para darle forma se recurre a tratamientos termomecánicos. Se esconde aquí el secreto del acero de Damasco: la temperatura de forja en caliente, que debe ser suficiente, para permitir el trabajo plástico de conformación, pero no excesivamente alta, para evitar la formación de fases cuya presencia sea perjudicial para las propiedades mecánicas deseadas.

La característica principal del material base del acero de Damasco constituye, al propio tiempo, su talón de Aquiles: el elevado contenido en carbono, que oscila entre el 1,4 y el 2 % en peso. Tamaña concentración provoca que, en su estructura cristalina interna, los límites de grano de la austenita —el cemento que une los cristales— aparezcan rellenos de cementita proeutectoide (Fe_3C), un carburo de hierro muy duro y fragilísimo. (Esta cementita proeutectoide o primaria aparece durante el enfriamiento de la estructura cristalina granular de austenita en sus límites de grano, en la llamada reacción eutectoide, antes de que aparezca la morfología perlítica laminar en el interior de los granos de esta fase.) Si la temperatura de forja se mantiene entre los límites inferior del rojo sangre (650 ºC) y superior del rojo cereza (850 ºC), los golpes de maza del herrero trituran esos cristales frágiles de cementita, repartiéndose los fragmentos por toda la matriz del acero y formando hileras en la dirección de alargamiento de la espada, lo que conlleva la aparición de un enfibrado beneficioso.

La extrema fragilidad de estos aceros, de elevado contenido en carbono, desaparece con la eliminación del cemento continuo y frágil que envuelve, como una argamasa, los cristales del acero. Además de la trituración del carburo de hierro, y de su reparto homogéneo en fibras por la matriz, la temperatura de trabajo consigue una esferoidización efectiva de estas partículas, hecho que potencia todavía más su influencia benéfica en el producto resultante.



3. ETAPAS para la obtención de la materia prima del acero de Damasco. Dependiendo de las condiciones reductoras del horno había tres posibles vías. En condiciones poco reductoras se obtenía una pella de hierro que se martilleaba para limpiarla y sacar el lingote; éste se introducía, conjuntamente con carbón vegetal, en un crisol que se sellaba luego. Después de un proceso de calentamiento a 1300 ºC se producía la carburación del metal; un enfriamiento lento daba lugar al acero de Damasco. En condiciones muy reductoras se obtenía el metal fundido con mucho carbono disuelto (fundición de hierro) que podía llegar a superar el 4,3 % en peso de carbono; el lingote, procedente de la colada del metal fundido, se introducía en un crisol, que, calentándose a 1300 ºC, con agitación o rascado constante, y tras un enfriamiento lento, daba lugar al acero de Damasco. Una tercera vía consistía en calentar hierro y fundición, a temperaturas de 1300 ºC, para, tras un enfriamiento lento, obtener el acero. El enfriamiento final, en todas las vías, se hacía muy lentamente para homogeneizar el acero y provocar un crecimiento de grano austenítico (cristales). El crisol debía mantenerse cerrado durante la etapa de enfriamiento para evitar cualquier oxidación ulterior.



4. PROCESO DE FABRICACION de una espada. Partiendo del lingote de acero se realiza una forja en caliente en el intervalo de temperatura adecuado (650-850 ºC). Luego, se templa en una solución desde la temperatura de 750-800 ºC, para, finalmente, realizar un ataque químico, con tierra de Damasco (solución acuosa ácida de sulfato férrico), de la hoja, lo que dará el aspecto externo de aguas que sirve como control de calidad del producto manufacturado.

Eliminado ya el aspecto negativo de su presencia, es decir, el constituir un relleno continuo a lo largo de los límites de grano de la austenita, la dureza de las partículas de carburo de hierro se convierte en un elemento sumatorio y beneficioso de las propiedades finales del acero, aportándole al filo del arma unas características excepcionales de dureza al corte y resistencia al desgaste.

La matriz del acero consta, sobre todo, de granos de austenita. Posee un contenido en carbono marcado por la composición eutectoide, punto singular del diagrama de equilibrio del sistema Fe-C, que se corresponde con un porcentaje de carbono del 0,8 % en peso. La microestructura cristalina resultante de esta composición influye también en las propiedades mecánicas finales del acero. Su enfriamiento normal al aire insta la aparición de una estructura perlítica, compuesta de láminas paralelas y alternas de dos materiales: cementita (carburo de hierro) y ferrita (hierro con una red cristalina cúbica centrada en el cuerpo). Esta estructura se caracteriza por su notable tenacidad y resistencia mecánica.

El trabajo en caliente, por encima de 720 ºC, permite la transformación de la fase perlita (ferrita y cementita) en austenita (fase cristalina con red cúbica centrada en las caras), que se distingue por su plasticidad. Esta es la razón principal por la cual los aceros se trabajan en caliente y por encima de la temperatura mencionada.

El límite superior de trabajo en caliente viene impuesto por transformaciones indeseables, una de las cuales consiste en la regeneración de la película de cementita frágil que envolvía a los granos de austenita antes de la operación de forja.

La tarea del herrero, a esas temperaturas, se hace muy penosa. Debe trabajar a oscuras para mejor observar el color rojo del acero en caliente. Tiene que golpear y calentar en una secuencia rápida y continua, esto es, realizar pocos golpes y volver a calentar enseguida, para mantener siempre en el intervalo de temperatura adecuado. También es necesario realizar un cepillado constante de la superficie al rojo con el fin de eliminar la cascarilla que se forma y así poder observar bien el color.

En estos aceros la decarburación en caliente es muy rápida. Ello obliga a conformar el arma empleando el mínimo número de golpes en el menor plazo de tiempo posible. El tiempo y la cadencia de la forja se controlaban con bastante exactitud, recitando versículos coránicos los musulmanes

u otros rezos los cristianos. No hay cante más severo y rítmico que el cante flamenco del martinete procedente del trabajo de los herreros andaluces. En tales condiciones de trabajo y temperatura, los aceros de alto contenido en carbono muestran un comportamiento superplástico, que permite conformar el arma a voluntad; pueden conseguirse alargamientos del mil por cien. A decir del maestro Pozón, trabajar estos aceros al rojo sangre y cereza es como hacerlo con la mantequilla.

Ya hemos conferido la forma adecuada a la espada, en el intervalo de temperatura señalado. Ahora viene el tratamiento térmico final de temple para proporcionarle las propiedades mecánicas deseadas: gran resistencia y dureza.

Eliminada, durante la forja, la cementita de entre los granos cristalinos, hay que cambiar la estructura perlítica consecuente del enfriamiento normal del acero. Las diferentes velocidades de enfriamiento que se imponen al acero, desde la temperatura de trabajo en caliente, determinan la aparición de diversas estructuras cristalinas que presentan propiedades mecánicas muy distintas y cuya secuencia de fases se acomoda al siguiente esquema: perlita, perlita fina (troostita), bainita superior, bainita inferior y martensita. La formación, en el proceso de temple, de estas fases aumenta la dureza y la resistencia. La aparición de una fase, o la combinación de varias de ellas, condiciona las propiedades mecánicas finales. El enfriamiento desde una temperatura por encima de la isoterma eutectoide, y el ciclo que se imponga a dicho enfriamiento, pueden suponer un mayor o menor endurecimiento del arma, llegando, incluso, a hacerla frágil. En la operación de temple radica la clave para mejorar el trabajo de forja o arruinarlo definitivamente. Tanto es así, que en numerosos casos no se templaba, ante el riesgo, por desconocimiento o mal control, de endurecer en exceso (fragilizar).

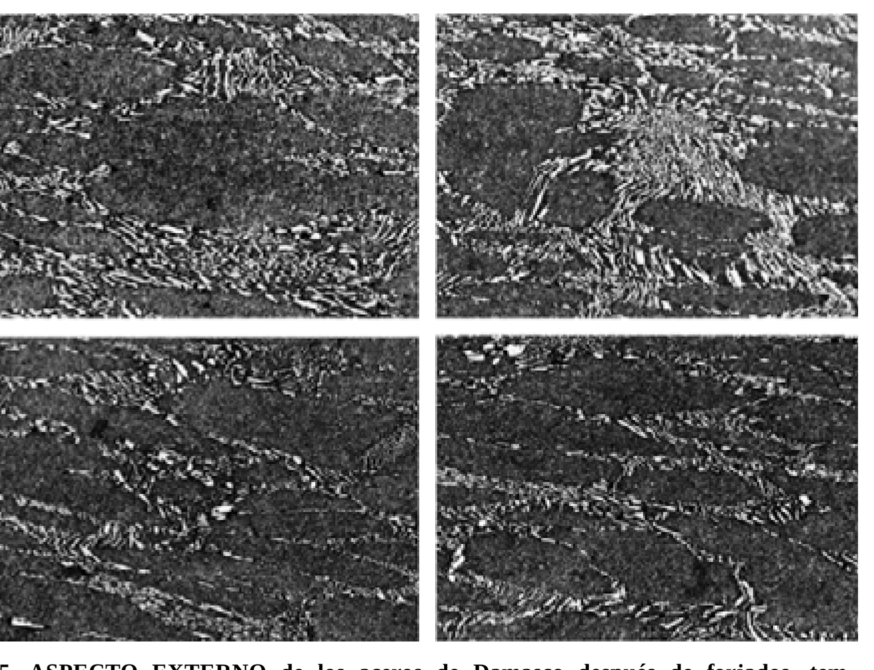
A menudo, bastaba la resistencia mecánica obtenida en la forja gracias a la abundante presencia de carburos dispersos.

Pero sólo los aceros “bien templados” adquirían las tenacidades y resistencias ideales. El temple severo, desde una temperatura ligeramente superior a 720 ºC, consigue una estructura martensítica con carburos dispersos en su matriz, que se corresponden con la cementita proeutectoide triturada durante la forja. La martensita (sistema tetragonal, con una retícula elemental similar a la cúbica centrada en el cuerpo) es una estructura que, a temperatura ambiente, retiene el exceso de carbono en la red cristalina del hierro; se trata, pues, de una estructura muy distorsionada. El carbono retenido proviene del exceso soluble a alta temperatura en la austenita, cuya solubilidad desciende en la transformación a martensita. Este carbono queda ocluido en los intersticios de los cristales de hierro, con la deformación consiguiente de los parámetros de red, que provoca una fuerte acritud que se traduce en una extrema dureza.

Para conseguir esta estructura martensítica, es necesario templar desde un punto intermedio entre el rojo sangre y el rojo cereza, que pueden ser los 790 ºC, en agua fría. Sin embargo, realizada así la operación se obtiene una excesiva dureza unida a una extremada fragilidad. Al punto óptimo se llegaba realizando un temple menos severo, como podemos ahora comprender gracias a los diagramas TTT (temperatura-tiempo-transformación) de enfriamiento controlado.

Sabemos hoy que las diferentes estructuras de enfriamiento rápido de un acero dependen de la temperatura de partida y del tiempo en que se mantenga a las distintas temperaturas intermedias hasta llegar al enfriamiento total. Jugando, pues, con la velocidad de enfriamiento y la permanencia, durante intervalos críticos, a determinadas temperaturas, puede manipularse la proporción relativa de perlita fina, bainitas (superior e inferior) y martensita en la estructura final.

La severidad del temple viene también condicionada por la temperatura y la naturaleza del líquido templante (aceite, agua u otros). La severidad constituye un factor crítico. Puede, en efecto, provocar la aparición de tensiones residuales intensas, que comportarían la generación de grietas y deformaciones.

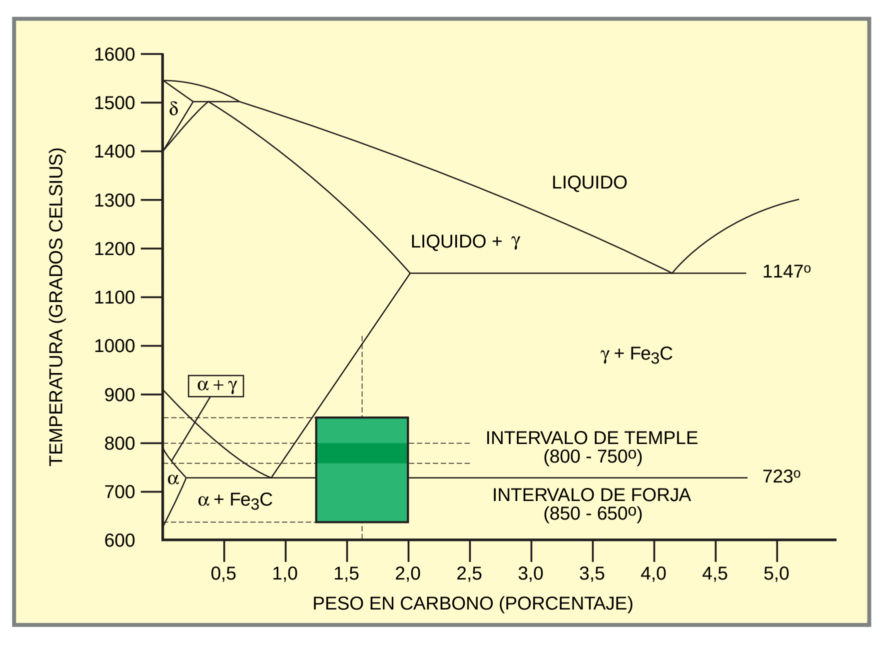


5. ASPECTO EXTERNO de los aceros de Damasco después de forjados, templados, pulidos y atacados con “tierra de Damasco”. La “barba de chino”, el “khar sini” de los alquimistas árabes medievales, es una característica de este tipo de aceros. Las estrías blanquecinas están formadas por hileras de carburos que proporcionan una elevada resistencia al desgaste del filo cortante. Manejando sabiamente el martillo, estas estrías pueden dar una imagen de escalera, llamada la “escalera de Mahoma”. Esta bella imagen puede servir de control de calidad y autenticidad de los aceros de Damasco legítimos. Las micrografías se corresponden con un acero del 2 % en peso de carbono.

La experiencia había enseñado a los herreros antiguos y medievales el comportamiento de esas variables. Sabían, por ejemplo, que el agua tibia (30 a 40 ºC) era menos endurecedora para el acero al rojo y, también, que había que realizar enfriamientos escalonados hasta la temperatura de temple, para que al sumergir la espada no quedaran tensiones fragilizantes en la hoja acerada. De acuerdo con una antigua leyenda, la espada debía calentarse hasta perder el brillo, enfriándose

después por debajo del color púrpura real e introduciéndose, finalmente, en el cuerpo de un esclavo musculoso, quien le transmitía su propia fuerza. En efecto, tras la forja a la temperatura adecuada en el menor tiempo posible, se calentaba la espada hasta acercarse al rojo cereza; enfriando después, muy rápidamente, hasta que desaparecía el color púrpura real. Con esta operación se traspasa la temperatura de transformación eutectoide, provocando la aparición de estructuras perlíticas y bainíticas muy resistentes, aunque poco frágiles, en una proporción que puede rondar entre el 40 y el 60 % del total de la estructura final, dependiendo del intervalo de tiempo en que se efectúe este tránsito.

El resto de la estructura no transformada se templa en agua tibia, a la que se puede añadir diversas substancias salinas con el fin de mejorar su conductividad y eficacia templante, a una temperatura aproximada a la del cuerpo humano —la del esclavo musculoso de la leyenda—, con lo que se obtiene una martensita de gran dureza. El empleo de agua tibia suaviza las condiciones del temple final, que, aunque severo, resulta eficaz gracias a la presencia de sales en el medio templante. La composición salina de la sangre y fluidos orgánicos del cuerpo humano se asemeja, entonces, a la del medio templante, lo cual justificaría la posible veracidad de la leyenda. La presencia de dichas sales aumenta la conductividad térmica mejorando la eficacia de la operación de enfriamiento. El menor gradiente de temperatura evita la aparición de tensiones superficiales indeseables, típicas de los aceros con muy alto contenido en carbono, que pudieran ser causa de deformaciones en la hoja de la espada.



6. DETALLE DEL DIAGRAMA de fases del sistema hierro-carbono. Se muestran los intervalos de temperatura adecuados para la correcta forja y temple de los aceros de Damasco, cuyos contenidos en carbono oscilan entre 1,4 y el 2 % en peso. El comportamiento a la forja a temperaturas bajas, incluso próximas a 650 ºC, es superplástico, algo en lo que no pensaron nunca los herreros europeos, y que puede considerarse como parte del secreto de la fabricación del acero de Damasco.

En nuestro examen de las espadas que se conservan en el Museo del Ejército de Madrid, hemos comprobado la existencia de una extensa gama de durezas intermedias, producto de temples controlados con los que se conseguían mezclas de estructuras de endurecimiento rápido: perlitas, bainitas y martensita en diversas proporciones. Las propiedades mecánicas obtenidas van desde una dureza notable en el filo cortante hasta una combinación excelente de resistencia mecánica y tenacidad en el resto de la hoja.

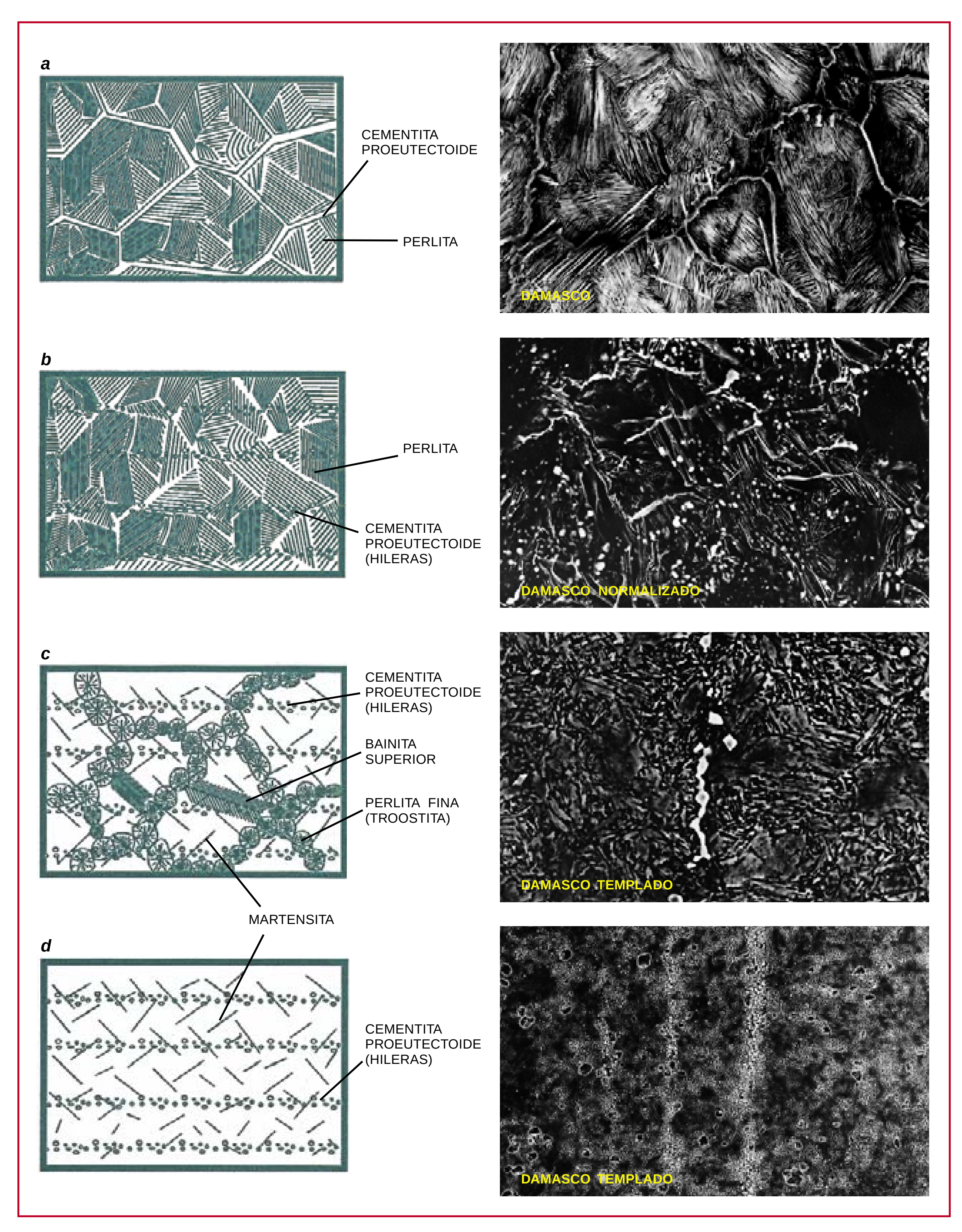
Para obtener estos resultados los herreros introducían la espada en agua. Sumergían la hoja de acero al rojo en un pilón de agua templada, ligeramente salina, en cuya superficie flotaba un paño basto, o un papel de estraza, impregnado en aceite, procurando que la espada se hundiera de canto y en posición paralela a la superficie líquida. El paño, o papel, se combaba ante el avance de la hoja de acero, envolviéndola sin apreturas, mientras chisporroteaba y siseaba. El maestro herrero escuchaba atentamente estos sonidos, sacando la espada del líquido templante en el momento oportuno, esto es, cuando la espada dejaba de "hablar", observando la aparición de un color blanquecino y azulado mientras se enfriaba al aire.

Cuando estas claves de color, provocadas por la oxidación en caliente de las estructuras del acero templado, son evidentes, se vuelve a sumergir la espada hasta su enfriamiento total. Simultáneamente a toda esta combinación de sonidos y colores, se sucede la transmisión de vibraciones del acero a la mano, según asegura el maestro Pozón. El chisporroteo y siseo en el agua producen ondas mecánicas que hay que saber sentir, ya que comunican el "sufrimiento" de la hoja de acero durante el temple.

Según Pozón, el pilón donde se enfría la espada debe ser amplio para poder escuchar y sentir correctamente. Tan comprometida es esta operación que jamás deja templar a nadie que no sea él mismo. En este rito todos los detalles son importantes, y la velocidad de respuesta del maestro herrero debe ser muy rápida. Los autores han podido comprobar los buenos resultados que proporciona la habilidad en el enfriamiento controlado, que ofrece un rendimiento superior a los realizados en el laboratorio.

El acero de Damasco, mecánicamente óptimo, posee un atractivo añadido: sus dibujos en forma de aguas, las famosas "barbas de chino". Estas aguas características de superficies pulidas servían de contraste y control de calidad. Una variante del dibujo era la "escalera de Mahoma", constituida por peldaños que se conseguían a golpe de martillo. No era fácil crear aguas tan bellas. El secreto de las "barbas de chino" consiste en partir de un acero de tamaño de grano austenítico grande, lo que se consigue con un enfriamiento muy lento, incluso de varios días, después de la operación de carburación o decarburación. La estancia a temperaturas altas, y el enfriamiento lento, provocan el crecimiento de los granos y la aparición masiva de carburo de hierro en sus límites. Las bandas de carburo de hierro resultan de la forja.

El pulido final de la espada y el ataque químico diferencial resaltan la estructura estriada dando la imagen típica. Un buen ataque de la superficie pulida es fundamental



7. CAMBIOS ESTRUCTURALES que se producen en la manufactura de los aceros de Damasco. La microestructura interna del acero es la causante de las propiedades mecánicas. El trabajo de forja en caliente, entre el rojo cereza y el rojo sangre, tritura el carburo de hierro (cementita) fragilizante situado en los límites de grano de la austenita (*a*) y la transforma en una estructura tenaz con estos carburos dispersados y esferoidizados alineados en bandas (*b*). El temple desde temperaturas por encima de los 720 ºC provoca la aparición de estructuras muy duras como la martensita, con los carburos de hierro esferoidizados enfibrados (*c*); si el temple es menos severo (enfriando en etapas), se puede llegar a estructuras combinadas de martensita muy dura y perlitas y bainitas más tenaces (*d*).

para resaltar las líneas de carburo de hierro frente a la matriz de acero eutectoide. Solía utilizarse un ataque ácido junto con alguna substancia oxidante. El *Libro de los Secretos* de Abu Bakr Muhammad ibn Zakariya al-Razi (860-923), nuestro Razés, aporta varias recetas de las "aguas ardientes" empleadas para el ataque o disolución de los metales. La combinación de ácidos como el vinagre, la leche agria y el jugo de limón, junto con vitriolos, sales de amoníaco, etc., producía unas combinaciones químicas eficaces para conseguir el ataque del acero de Damasco. El secreto de la "tierra de Damasco", que hemos comprobado en nuestro laboratorio, no es otro que el dejar en disolución sulfato férrico después de su lixiviación con agua. Esta sal, oxidante en medio ácido, sirve de reactivo de ataque. Ataca selectivamente la matriz de acero, dejando inalterados los carburos de hierro en bandas, cuyo brillo y color blanco proporcionan la imagen de la "barba china". No es la única receta útil, pero sí una de las más sencillas y de más fácil control.

Los falsos damasquinados conseguidos por múltiples y complicadas técnicas nunca llegaron a alcanzar el prestigio y calidad de los legítimos, que guardaron celosamente su secreto hasta la actualidad. Que las prestaciones mecánicas son magníficas queda demostrado en el renovado interés actual que la industria muestra por obtenerlos de nuevo, en unas condiciones de fabricación que les haga competitivos por su calidad, prestaciones y precio. Estos aceros podrían sustituir a muchos aceros, superaleaciones y materiales diversos; así, volvería la magia de ayer a cumplir con un nuevo destino.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A HISTORY OF METALLOGRAPHY. C. S. Smith. The University of Chicago Press, 1960.

DAMASCUS STEEL, PART I: INDIAN WOOTZ STEEL. J. D. Verhoeven, en *Metallography* n.º 20, páginas 145-151, 1987.

DAMASCUS STEEL, PART II: ORIGIN OF THE DAMASK PATTERN. J. D. Verhoeven y L. L. Jones, en *Metallography* n.º 20, páginas 153-180, 1987.

METALURGIA PREHISTÓRICA. INTRODUCCIÓN A LA PALEOMETALURGIA. J. P. Mohen. Editorial Masson, S.A., 1992.

Premios Nobel 1996

La Real Academia de Ciencias sueca ha reconocido el mérito y la excepcional contribución de cuatro equipos investigadores. Vale la pena detenerse en el trabajo que se esconde detrás de esos éxitos en química, física, medicina y economía

John Rennie, Paul Wallich y Philip Yam

QUIMICA

BUCKYBOLAS

ROBERT E. CURL
Universidad de Rice

HAROLD W. KROTO
Universidad de Sussex

RICHARD E. SMALLEY
Universidad de Rice

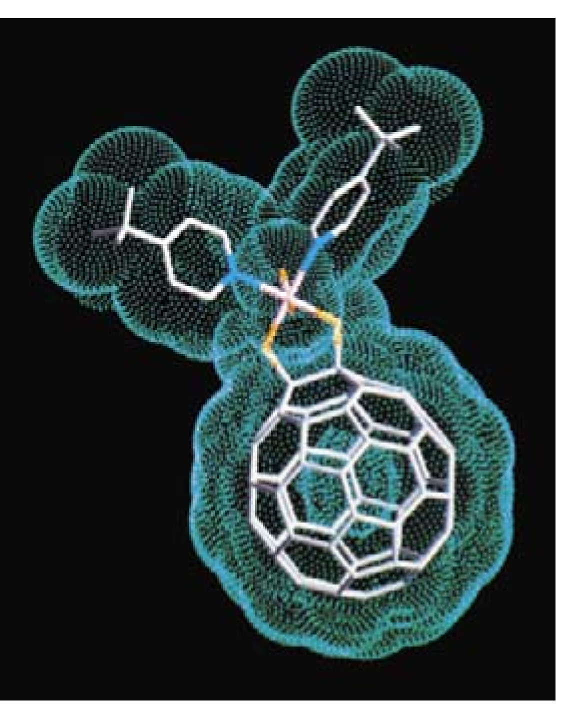
Se concedió el Nobel de química a Robert F. Curl, Harold W. Kroto y Richard E. Smalley por su descubrimiento, en 1985, del buckminsterfullereno, tercera forma del carbono en la que los átomos se disponen en una suerte de jaula esférica y cerrada. (Las otras dos formas del carbono son el grafito y el diamante, que presentan, respectivamente, una configuración laminar y tetraédrica.) El prototipo de la familia del fullereno es el carbono 60 (C_{60}), que recuerda a un balón de fútbol. Debe su nombre al parecido que esta molécula guarda con la cúpula geodésica ideada por el arquitecto e inventor norteamericano Buckminster Fuller. Cinco años después del descubrimiento, otros hallaron una manera de producir fácilmente cantidades ingentes de fullernos. Así brotó una rama nueva de la química orgánica.

Curl, Kroto y Smalley, junto con James R. Heath y Sean C. O'Brien, estos últimos alumnos de segundo ciclo de Rice, hallaron las "buckybolas" por carambola. En Sussex, Kroto se ocupaba del estudio de las atmósferas ricas en carbono de las estrellas gigantes rojas; mediante espectroscopía observó que contenían largas cadenas de moléculas de carbono y nitrógeno.

Kroto pidió ayuda a sus colegas de Rice para desentrañar el mecanismo de formación de tales moléculas en las atmósferas estelares. Smalley había construido un aparato que permitía crear microagregados moleculares. En el aparato, un láser vaporizaba una pequeña porción del material a ensayar. La materia vaporizada, en forma de plasma, se enfriaba con gas helio y se inyectaba en una cámara de vacío. Este chorro de material se expandía supersónicamente. En virtud de ello, las moléculas se agrupaban en agregados de diversos tamaños y se enfriaban hasta la proximidad del cero absoluto, haciéndolos suficientemente estables para su estudio en un espectrómetro de masas.

El carbono 60 tiene la forma de armazón de un balón de fútbol

Smalley y Curl habían empleado el aparato para examinar agregados metálicos que podrían ser útiles en semiconductores. El material sujeto a ensayo se cambió por carbono el 1 de septiembre de 1985, cuando Kroto llegó para una visita. Con el aparato, hallaron que el carbono prefería formar agrupaciones de 60 átomos, y en menor grado de 70. Se trataba de unas agrupaciones sumamente estables: el C_{60} no reaccionaba cuando se le sometía a la acción del hidrógeno y el amoníaco gaseosos. En un comienzo, no acababan de entender por qué 60 átomos de carbono, estructurados en sus formas laminares y tetraédricas características, podían dejar de presentar enlaces colgantes que se trabaran con otras moléculas. Tras días de discusión, llegaron a la conclusión de que los 60 átomos de carbono debían de estar dispuestos en forma de un



La "bola conejito", más formalmente descrita como C_{60} (O_sO_4)(4-tert-butilpiridina)$_2$, es una de las numerosas variaciones químicas de la buckybola clásica

icosaedro truncado que constaría de 12 pentágonos y 20 hexágonos: en otras palabras, un balón de fútbol.

Ulteriores investigaciones mostraron que el carbono podía formar cierta variedad de estructuras jaulares, a partir de un mínimo de 32 átomos. La estructura satisface el teorema de Euler: a partir de 12 pentágonos y determinado número de hexágonos se puede construir cualquier poliedro con más de 22 aristas pares.

El aparato de Smalley adolecía de cierto inconveniente; a saber, sólo podía crear cantidades microscópicas de fullerenos. En 1990, Donald R. Huffman y Lowell Lamb, de la Universidad de Arizona, y Wolfgang Krätschmer y Constantinos Fostiropoulos, del Instituto Max Planck de Física Nuclear de Heidelberg, hallaron una manera sencilla de fabricar fullerenos en cantidades del orden del gramo. Mostraron que un arco eléctrico entre dos barras de grafito vaporizaba algo del carbono, que después se recondensaba en fullerenos.

Con esta técnica, la investigación de los fullerenos se disparó. Los expertos hallaron que podían encerrar otros átomos dentro de una buckybola (el C_{60} tiene un diámetro de alrededor de un nanómetro). Agregando rubidio y cesio al C_{60}, éste se transformaba en una substancia superconductora a 33 kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). Las estructuras en buckybola se podían también estirar para formar nanotubos huecos.

Se han propuesto fullerenos como lubricantes, catalizadores y vehículos para la administración de fármacos. Si los nanotubos de carbono se pueden alargar hasta longitudes convenientes sin defectos, podrían servir de cables bidimensionales más resistentes que el acero. Hasta ahora, sin embargo, la imaginación ha ido muy por delante de las esquivas aplicaciones prácticas. La propia fabricación de muestras libres de defectos resulta todavía cara y lenta. No obstante, muchos observadores consideran que el que esas moléculas hallen aplicaciones prácticas es sólo cuestión de tiempo. Y en cualquier caso, los fullerenos han alterado para siempre los fundamentos teóricos de la química y la ciencia de los materiales.

Publicado en *Investigación y Ciencia*

FULLERENOS. Robert F. Curl y Richard E. Smalley, n.º 183, diciembre de 1991.

R. E. SMALLEY, CAMPEON DE LAS BUCKYBOLAS. Philip Yam, n.º 206, noviembre de 1993.

FISICA

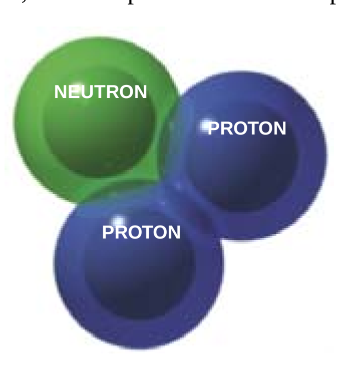
UN NUEVO SUPERFLUIDO

David M. Lee
Universidad de Cornell

Douglas D. Osheroff
Universidad de Stanford

Robert C. Richardson
Universidad de Cornell

La superfluidez es un fenómeno harto raro, exclusivo del elemento helio. Cuando el helio 4, el isótopo más corriente, se enfría hasta 4,2 kelvin, el gas se condensa en forma de líquido. Si lo enfriamos todavía más, hasta 2,7 kelvin, no se congela en forma sólida, como sí ocurre con cualquier otra substancia. Antes bien, se transforma en superfluido. Vale decir, fluye sin viscosidad, se mueve a través de diminutos poros y, cuando se le hace girar, produce minivórtices que obedecen las reglas cuánticas.



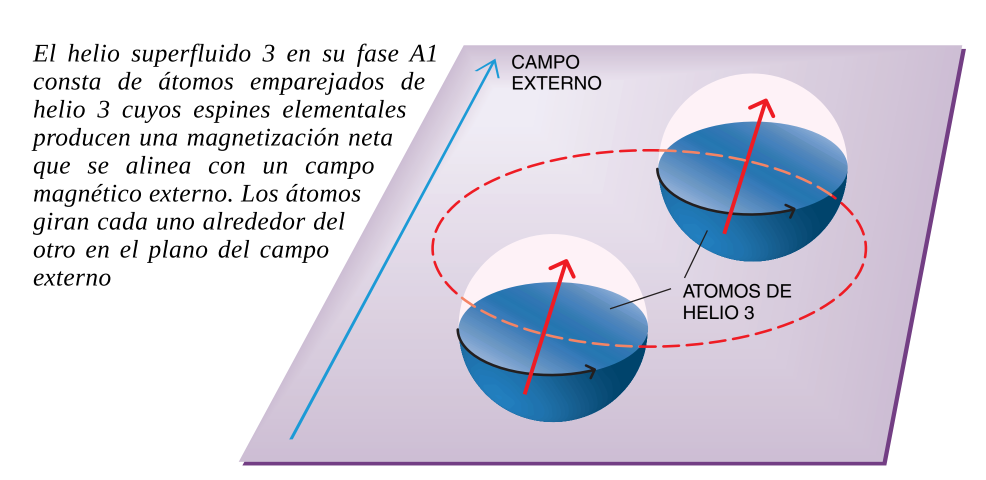
El núcleo de helio 3 consta de dos protones y un neutrón

El físico ruso Piotr Kapitza observó ya la superfluidez en 1938, cuando estudiaba el helio 4. Ahora el Nobel de física ha recaído en David M. Lee, Douglas D. Osteroff y Robert C. Richardson; se les premia haber demostrado la existencia de superfluidez en un raro isótopo, el helio 3: fenómeno que hasta entonces se reputaba imposible.

El helio 4 puede convertirse en superfluido porque consta de un número par de partículas subatómicas (dos protones, dos neutrones y dos electrones), formando un bosón. Los bosones obedecen la estadística de Bose-Einstein, esto es, reglas que permiten que todos los átomos de helio de una muestra se condensen en un estado común de mínima energía. Los átomos pierden entonces su individualidad y esencialmente se comportan como una entidad única. (Todos los átomos adquieren la misma función de onda, ecuación que describe las partículas cuánticas.) A escala macroscópica, esta singular identidad se manifiesta en forma de superfluidez.

Pero durante años después del descubrimiento de la superfluidez en el helio 4, los físicos no creían que lo mismo pudiera ocurrir en el helio 3. Su número impar de constituyentes (dos protones, un neutrón y dos electrones) numera el helio 3 entre los fermiones. Obedece a la estadística de Fermi-Dirac, que especifica que los fermiones no pueden compartir el mismo estado de energía.

En 1957, sin embargo, John Bardeen, Leob Cooper y J. Robert Schrieffer propusieron una forma en que los fermiones podían combinarse a la manera de los bosones. Investigaban el fenómeno de la superconductividad, o paso de electrones por un conductor sin resistencia. Adujeron que dos electrones (que en cuanto partículas individuales son fermiones) pueden emparejarse bajo la influencia de los átomos circundantes, convirtiéndose en un solo bosón. De manera análoga, dos átomos de helio 3 se pueden emparejar para formar



El helio superfluido 3 en su fase A1 consta de átomos emparejados de helio 3 cuyos espines elementales producen una magnetización neta que se alinea con un campo magnético externo. Los átomos giran cada uno alrededor del otro en el plano del campo externo

un bosón, por medio de un proceso más complicado en el que interviene el magnetismo.

Una vez que los físicos cayeron en la cuenta de que el helio 3 podría adquirir carácter bosónico, se propusieron enfriar el isótopo en cuantía suficiente para comprobar si aparecía la superfluidez. Aprovechando nuevas técnicas de enfriamiento desarrolladas en los años sesenta, Lee, Osheroff y Richardson idearon su propio refrigerador en la Universidad de Cornell. Hicieron uso de una propiedad insólita del helio 3: hay que *añadir* calor para enfriarlo, porque la fase sólida no está tan ordenada como la fase líquida. Los físicos se dieron cuenta de que aplicando presión al helio líquido podían transformar en sólido parte del mismo. La parte en solidificación extraería entonces calor del líquido, enfriándolo. El proceso puede enfriar el líquido hasta algo por debajo de dos milikelvin (0,002 kelvin) antes de que el líquido se solidifique.

Los investigadores de Cornell se ocupaban de las propiedades magnéticas del helio 3 cuando hicieron su descubrimiento. Osheroff, entonces estudiante de segundo ciclo, observó variaciones en el cambio de la presión interna con el tiempo. Esas variaciones corresponden a la transición del helio 3 a la superfluidez.

Ulteriores mediciones revelaron que, a diferencia del helio 4, el isótopo 3 tiene tres fases superfluidas, que se deben a diferencias en los espines elementales de los átomos. En la fase A, que se produce a 2,7 milikelvin, los dos átomos de helio 3 en un par bosónico presentan espines aproximadamente paralelos. En la fase B, que se da a 1,8 milikelvin, los átomos tienen espines opuestos (paralelo y antiparalelo). La tercera fase, A1, aparece cuando se aplica un campo magnético a la fase A; los átomos emparejados poseen espines paralelos que todos apuntan en la misma dirección.

Más tarde fue poniéndose en claro lo mucho que el helio 3 superfluido difiere del helio 4. Ambos superfluidos, cuando se hacen girar, producen vórtices microscópicos cuya circulación toma valores cuantificados. Pero el helio 3 muestra una variedad mucho más rica de vórtices con apariencias más complejas.

Las aplicaciones del helio 3 superfluido se hallan todavía restringidas al dominio de la física fundamental, donde sirven de pruebas para otras teorías. Por ejemplo, los físicos han usado los vórtices en el helio 3 superfluido para simular cuerdas cósmicas, entidades que hipotéticamente se formaron cuando el joven universo se enfrió después de la "gran explosión" y que pueden haber servido de semilla para la formación de las galaxias. Los estudios de helio 3 pueden también iluminar la superconductividad a alta temperatura, para la cual no hay explicación definida.

Publicado en *Investigación y Ciencia*

HELIO 3 SUPERFLUIDO. N. David Mermin y David M. Lee, n.º 5, febrero de 1977.

LOS SUPERFLUIDOS DEL 3He. Olli V. Lounasmaa y George Pickett, n.º 167, agosto de 1990.

FISIOLOGIA O MEDICINA

DESCIFRAMIENTO DE UNA DEFENSA ANTIVIRICA

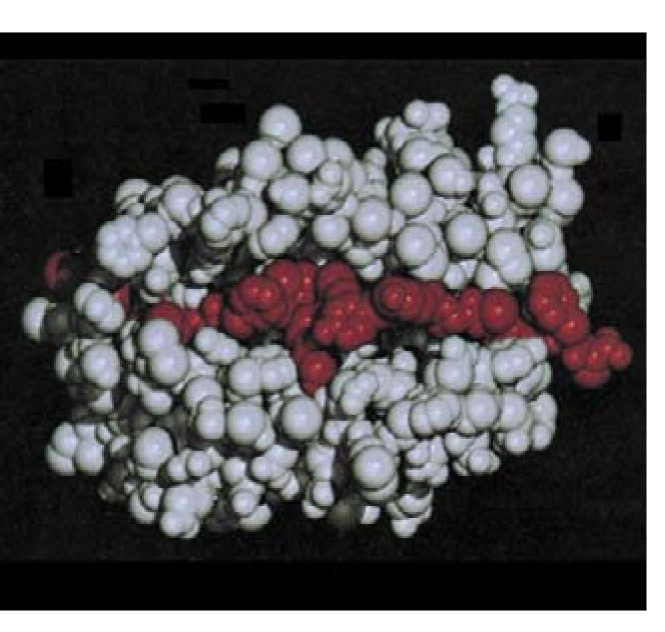
PETER C. DOHERTY
Hospital Pediátrico de San Judas
Menfis, Tennessee

ROLF M. ZINKERNAGEL
Universidad de Zürich

Pocos avances recientes de la inmunología han resultado tan decisivos como el de haber acotado el complejo principal de histocompatibilidad (MHC), un principio clave a la hora de entender la forma en que el organismo combate la infección. Debemos ese hito a Peter C. Doherty y Rolf M. Zinkernagel, quienes esbozaron la idea mientras se aprestaban a resolver cierto problema particular de veterinaria médica. El resultado, inesperado, les ha valido el premio Nobel de fisiología y medicina de 1996.

A lo largo de los últimos cien años, los inmunólogos venían aceptando la idea según la cual bacterias y virus se bastaban por sí solos para poner en funcionamiento las defensas del sistema inmunitario. Se sabía que los anticuerpos reconocían y atacaban directamente a los agentes invasores, por lo que parecía razonable suponer que los linfocitos *T* y otros leucocitos hicieran otro tanto. Esta hipótesis, sin embargo, dejaba cuestiones sin respuesta.

Una: ¿de qué modo el sistema inmunitario distinguía las células sanas de las infectadas en cuyo interior se



Una proteína del complejo principal de histocompatibilidad MHC (gris) *muestra un péptido antigénico* (rojo)

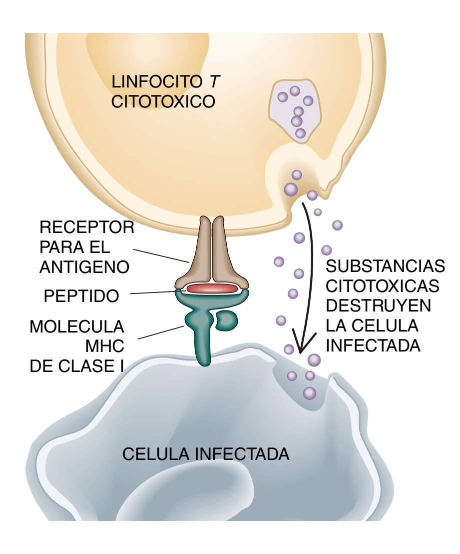
escondían los virus a resguardo, tal parece, del sistema inmunitario? Otra: ¿a qué obedece la amplia variabilidad de la respuesta inmunitaria? En los años sesenta, Hugh O. McDevitt, de la Universidad de Harvard, demostró que la intensidad de la repuesta inmunitaria de un animal guardaba relación con la presencia de genes que cifraban determinadas proteínas del complejo principal de histocompatibilidad. Se sabía de la importancia de estas proteínas en los trasplantes de órganos: si el perfil MHC del donante no coincidía con el del receptor, se rechazaba el injerto. Se ignoraba, sin embargo, cuál podía ser su función natural. La forma en que intervenían las proteínas del complejo principal y otros factores en el ataque inmunitario desatado constituía, a todas luces, una cuestión de largo alcance.

Doherty y Zinkernagel coincidieron por casualidad en la facultad John Curtis de medicina de la Universidad Nacional de Australia. Estaban ocupados en un problema menos ambicioso. Les interesaba averiguar por qué morían los ratones de laboratorio infectados por el virus de la coriomeningitis linfocítica, siendo así que este agente no mata las células hospedantes. Partían de la hipótesis según la cual los linfocitos *T*, que atacaban los tejidos víricamente infectados del encéfalo y la médula espinal, desencadenaban una inflamación letal.

Para someter tal hipótesis a prueba, Doherty y Zinkernagel aislaron células *T* del líquido cerebroespinal de ratones afectados de meningitis. Las cultivaron luego con células extraídas de ratones sanos. Y las expusieron a la acción vírica. Según lo esperado, las células *T* destruyeron a las células infectadas.

Pero, sabedores del hallazgo de McDevitt y de los resultados obtenidos en otras investigaciones, decidieron repetir sus propio experimentos, ahora con ratones de estirpes seleccionadas. Y observaron entonces un comportamiento curioso: las células *T* procedentes de una estirpe de ratones no mataban las células infectadas si eran de otra estirpe distinta, salvo que ambas estirpes compartieran al menos una proteína MHC. Doherty y Zinkernagel propusieron la hipótesis de doble señal, esto es, que los linfocitos *T* no podían desencadenar una respuesta inmunitaria a menos que estuvieran doblemente expuestos: a péptidos (fragmentos de proteína) antigénicos de origen vírico o bacteriano y a proteínas apropiadas del sistema de histocompatibilidad.

Su descubrimiento cimentó las bases de una explicación pormenorizada de la regulación del sistema inmunitario. Trabajos ulteriores demostrarían que las moléculas MHC de la superficie celular fijan y presentan péptidos antigénicos; los péptidos se acomodan,



La proteína del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) y un péptido vírico, situados en la superficie celular, permiten que el linfocito T *pueda descubrir la célula infectada. El receptor para el antígeno de la célula* T *debe ser complementario de ambos, es decir, de la proteína MHC y del péptido*

englobados, en una hendidura de la porción superior de la molécula MHC. Las moléculas MHC de clase I presentan péptidos derivados de proteínas de la propia célula. Se comprende su importancia en la señalización de células enfermas o alteradas. Las moléculas MHC de clase II, que se encuentran sólo en ciertos tipos celulares, presentan péptidos procedentes de residuos de células destrozadas. Revisten particular interés para la detección de parásitos extracelulares.

Las células *T* poseen receptores moleculares que se encajan, de manera complementaria, en el complejo MHC-péptido. Para la activación de una célula *T* es necesario un ajuste cabal entre el receptor y la combinación MHC-péptido específica. Este fenómeno da cuenta del resultado de doble señal que observaron Doherty y Zinkernagel.

En la actualidad, los inmunólogos saben que la actividad de las células *T* depende también de otros cofactores moleculares, cuya presencia, o ausencia, en una célula examinada por el sistema inmunitario en busca de signos de infección puede terminar de modular la respuesta inmunitaria. En cualquier caso, el reconocimiento del complejo MHC-péptido se encuentra en el centro de este mecanismo inmunológico y es por su papel en este descubrimiento por lo que Doherty y Zinkernagel han sido premiados.

Publicado en *Investigación y Ciencia*

RECONOCIMIENTO INMUNITARIO DE CUERPOS EXTRAÑOS. Charles A. Janeway, Jr. Noviembre de 1993.

PRESENTACIÓN CELULAR DE LOS ANTÍGENOS. Victor H. Engelhard, octubre de 1994.

ECONOMIA

EL PRECIO JUSTO DE LA MERCANCIA

WILLIAM VICKREY
Universidad de Columbia

JAMES A. MIRRLEES
Universidad de Cambridge

Los análisis tradicionales de la economía eficaz del mercado dan por supuesto que existe un conocimiento cabal de los datos. Parten de



La licitación secreta, por el desigual conocimiento de los datos, daña la eficiencia de la economía. En una subasta ordinaria, los licitantes suben o bajan sus ofertas porque desconocen las valoraciones que hacen los otros. Una almoneda "al segundo precio" hace ventajoso el revelar las valoraciones

la idea de que cuantos intervienen en una transacción dominan todos los pormenores relativos a las mercancías en transacción y saben qué valores les adjudican los vendedores y los compradores. Naturalmente, en el mundo real, casi nunca se cuenta con una distribución de los datos tan simétrica. El más reciente premio Nobel de economía lo obtuvieron William Vickrey y James A. Mirrlees por su contribución a hacer más realistas estos análisis ideando fórmulas superadoras de tales desigualdades.

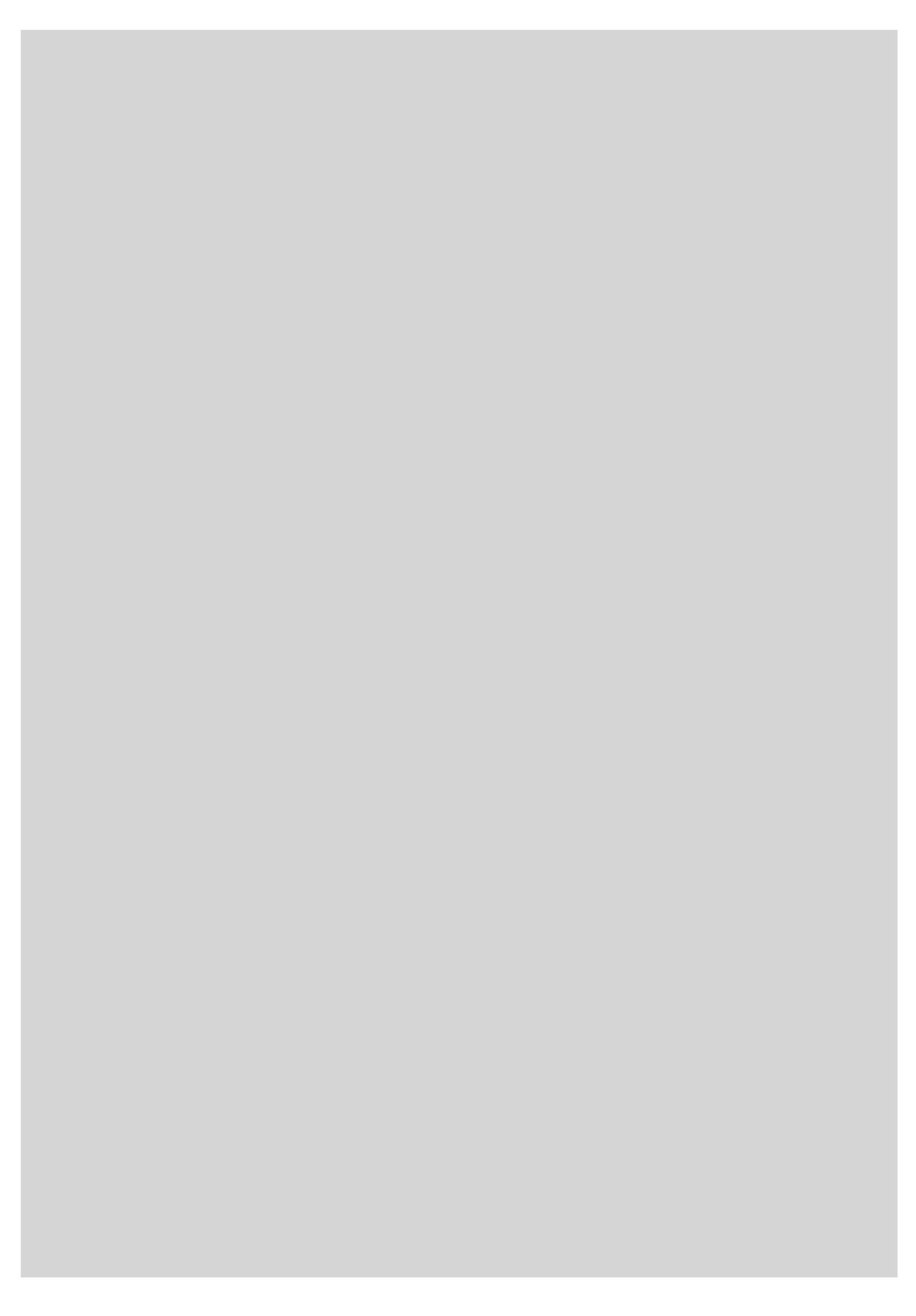
Considérese el caso de una subasta con licitaciones selladas. Ninguno de los licitadores sabe cuánto están dispuestos a pagar los otros por el lote subastado. El conjunto de las licitaciones no revela gran cosa acerca del auténtico valor de lo subastado, pues quizá los licitadores traten de conseguir una ganga. Las posibilidades son que la licitación ganadora acabe pagando un precio excesivo (porque valoró el objeto de la subasta mucho más que sus competidoras) o que acabe pagando demasiado poco (porque todas apuntaron a la baja). Ambos resultados laboran contra el rendimiento económico, porque el precio pagado no refleja el valor real.

A comienzos de los años sesenta, Vickrey resolvió el problema de las subastas con su técnica de la "almoneda al segundo precio". Los potenciales compradores entregan sus licitaciones selladas; el licitador que ofrece pagar más es el que gana, pero sólo ha de abonar la cantidad ofrecida por el que queda segundo. Así, todos se hallan incentivados para licitar conforme al precio que les parece justo: rebajándolo demasiado se excluirán de la competición y, si pujan muy alto, corren el riesgo de que el que quede segundo abone también más dinero que el que están dispuestos a pagar. El quid de la solución ideada por Vickrey está en su proyecto de una institución mercantil que funcione en interés de la gente, proporcionando una información que, sin este medio, suele permanecer oculta.

Vickrey se había ocupado ya antes de similares asimetrías en materia de impuestos. Como señaló en los años cuarenta, el gobierno no sabe cuánto está dispuesta la gente a trabajar para ganarse un duro extra, y así es incapaz de predecir en qué proporción los impuestos sobre la renta harán que disminuya la producción económica general, porque a la gente le falten alicientes para el trabajo o porque tenga que trabajar más horas para cubrir las necesidades básicas cuando preferirían disfrutar de tiempo libre. El se esforzó por hallar una estructura fiscal óptima, pero, aunque hizo algún progreso, no logró superar la complejidad puramente matemática del problema.

Sin embargo, sus esfuerzos le sirvieron de inspiración a Mirrlees, quien en 1971 consiguió hacer más abordables las matemáticas subyacentes. Su método analítico, que resultó aplicable a una amplia gama de situaciones, demostró que, en general, el mejor modo de superar las desigualdades de información consiste en crear incentivos para que, directa o indirectamente, se revelen datos. En el caso de los impuestos, el gobierno debería fijar unos coeficientes, de tal forma que los trabajadores viesen que merecía la pena manifestar sus preferencias productivas, en vez de sentirse obligados a trabajar más —o menos— de lo que quisieran. (Por razones prácticas y políticas, nadie ha tratado nunca de introducir la técnica fiscal de Mirrlees.)

Estas técnicas se han aplicado en muchas otras áreas de la economía. Por ejemplo, durante los setenta, Mirrlees desarrolló una teoría formal de escalas de pagos a dirigentes que determinaba cuántas primas de gratificación deberían dárseles a los ejecutivos por un buen año y —lo que es menos usual— cuánto debería quitárseles del sueldo por su mala gestión. Vickrey estudió la manera de fijar el precio a los bienes públicos: carreteras y transportes. Fue uno de los adelantados en proponer que, para los peajes de tránsito, se tenga en cuenta la congestión de la vía, de modo que lo que se pague por entrar en una autopista dependa del número de automóviles que en ese momento estén circulando por ella. Tales peajes se han propuestos en varios países; con las nuevas técnicas de transacción digital pronto serán muy factibles. En la ciudad de Nueva York, donde el metro y las aceras son, con mucho, los medios de transporte más frecuentados, estuvo Vickrey trabajando hasta morir, de un ataque al corazón, a los tres días de otorgársele el merecido galardón.



Ciencia y sociedad

Lisosomas

Algo más que vertederos celulares

En todos los organismos, lo mismo eucariotas que procariotas, las proteínas intracelulares están sometidas a un proceso continuo de síntesis y degradación. Bastan pequeños cambios en la actividad de estos procesos para que las células modifiquen de forma rápida los niveles de las distintas proteínas y se adapten a las nuevas condiciones del medio extracelular.

Además de ese control de la homeostasis intracelular, compete a los sistemas de degradación de proteínas eliminar de la célula todo tipo de proteínas anómalas e intervenir en la regulación del ciclo celular y de otros procesos; entre éstos, la morfogénesis, la diferenciación celular, la respuesta inmune y el tráfico intracelular de proteínas.

Tradicionalmente, los sistemas proteolíticos celulares se han dividido en dos grandes grupos de acuerdo con su ubicación en el interior de la célula: sistemas lisosómicos y sistemas no lisosómicos (grupo en el que se incluyen todas las proteasas alojadas en otros orgánulos y en el citosol). Pese a esta división, se conocen múltiples interacciones funcionales entre las distintas vías degradativas.

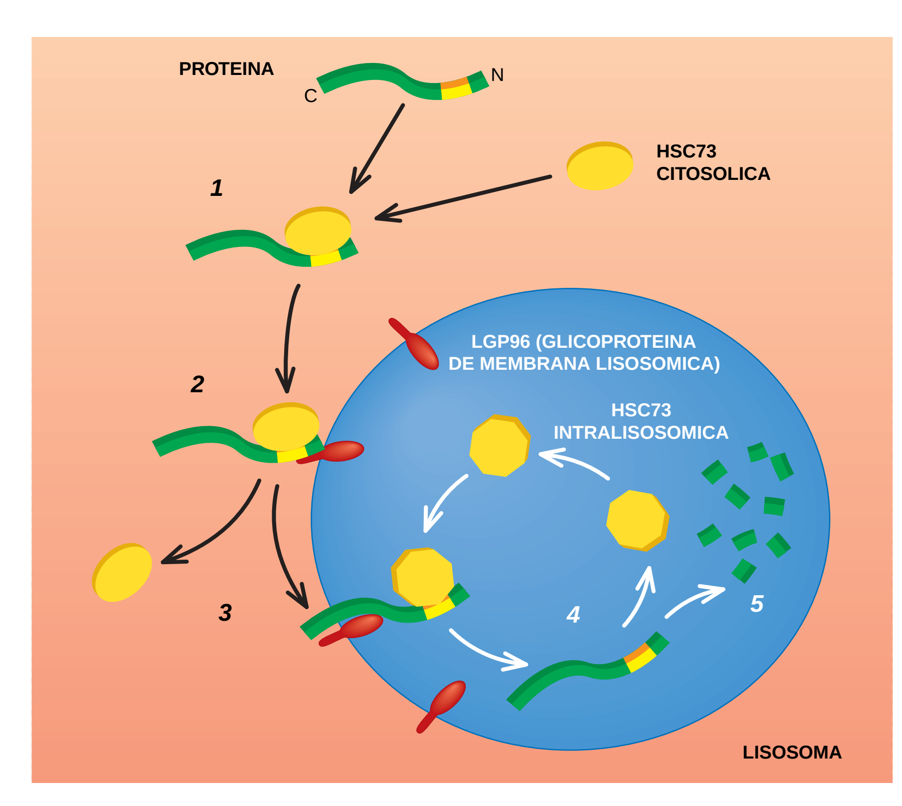
Durante muchos años, todos los procesos intracelulares de degradación selectiva de proteínas se atribuyeron a los sistemas citosólicos. En éstos, la proteolisis está sometida a un estricto control por potentes inhibidores y activadores de proteasas y de moléculas reguladoras (por ejemplo, la ubiquitina). Por otro lado, a los lisosomas, orgánulos celulares dotados de una potente maquinaria enzimática, se les asignó la degradación general, no selectiva, de la mayoría de las proteínas intracelulares. Sin embargo, no dejan de aparecer pruebas que apoyan la existencia de mecanismos de degradación específica de ciertas proteínas en los lisosomas.

Entre las múltiples proteínas que pueden ser objeto de degradación en los lisosomas se encuentran las proteínas de la membrana celular y las proteínas extracelulares. Estas proteínas, una vez internalizadas por los endosomas (estructuras vesiculares del interior celular), sufren una completa degradación tras la fusión de estos orgánulos con lisosomas en un proceso de heterofagia. Una fusión similar se produce entre los lisosomas y las vesículas de secreción, que contienen proteínas sintetizadas en el interior celular y cuyo destino último reside en el medio extracelular. Este proceso degradativo de crinofagia, así se le llama, es el responsable de la regulación de los niveles de secreción celular de proteínas.

El otro grupo amplio de substratos lisosómicos lo constituyen las proteínas citosólicas. Se sirven de diversos mecanismos de transporte para arribar al interior de los lisosomas. Por ejemplo, los lisosomas engloban porciones de citosol, a veces orgánulos completos, en un proceso de macroautofagia o de microautofagia, según el tamaño de la porción citosólica englobada.

La autofagia lisosómica se caracteriza principalmente por su falta de selectividad. Una vez en el interior del lisosoma, las proteínas englobadas se degradan de forma conjunta. Corresponde a la microautofagia, siempre activa, mantener los niveles basales de proteolisis intracelular; a la macroautofagia, que se activa de preferencia en las primeras fases de privación de nutrientes, aportar a la célula los aminoácidos necesarios para la síntesis de proteínas esenciales.

Además de estos dos procesos no selectivos de degradación de proteínas



Transporte directo de proteínas citosólicas a través de la membrana del lisosoma. Existe en esta vía degradativa directa una "señal marcadora" en la proteína substrato que es reconocida por la proteína de choque térmico de 73 kilodalton (1). *Compete a la proteína hsc73 mantener a la proteína substrato en una conformación adecuada para favorecer su unión a la membrana lisosómica y su posterior transporte a través de la misma. El primer componente de este sistema de transporte identificado es la lgp96, cuya región carboxi-terminal sirve de punto de anclaje para las proteínas substrato. Tras la unión a la membrana lisosómica* (2), *las proteínas se adentran en el interior del lisosoma* (3). *Una vez en la matriz, y tras disociarse de la hsc73 lisosómica* (4), *la proteína se degradará* (5)

citosólicas en los lisosomas, se ha confirmado la existencia de un transporte directo de ciertas proteínas citosólicas a través de la membrana lisosómica. En este proceso, muy similar al transporte de proteínas a otros orgánulos celulares (mitocondrias, retículo endoplasmático, vacuolas, etcétera), intervienen factores citosólicos, componentes de membrana y proteínas intralisosómicos.

Aunque no se ha identificado todavía el estímulo que activa esta vía degradativa directa, sí que se conoce la existencia de una "señal marcadora" en la secuencia de aminoácidos de la proteína substrato (sucesión de lisina-fenilalanina-ácido glutámico-arginina-glutamina), responsable de la interacción con el factor citosólico implicado en esta vía, la proteína de choque térmico de 73 kilodalton. Esta hsc73, siglas por las que se conoce a la proteína de choque térmico, mantiene a la proteína substrato en una conformación adecuada para favorecer su unión con la membrana lisosómica y su posterior transporte a través de la misma.

Recientemente, se ha identificado el primer componente de este sistema de transporte, una glicoproteína integral de la membrana lisosómica de 96 kilodalton (lgp96), cuya región carboxi-terminal aparece expuesta en la superficie del lisosoma y sirve de punto de anclaje para las proteínas substrato.

Tras la unión a la membrana del lisosoma, las proteínas viajan al interior en un proceso de transporte que requiere la presencia en la matriz lisosómica de una proteína de choque térmico de 73 kilodalton, variante de la forma citosólica. Por comparación con otros transportadores celulares, la hsc73 lisosómica podría actuar como fuerza motriz que, tras anclarse a la porción de proteína que alcanza en un primer momento la matriz lisosómica, empujaría al resto de la proteína hacia el interior. Una vez en la matriz, y tras disociarse de la hsc73 lisosómica, la proteína se sometería a su completa degradación.

Importa destacar que esta vía selectiva de degradación lisosómica de proteínas citosólicas, aunque puede operar en condiciones basales, se activa sobre todo en situaciones de ayuno prolongado. En tales condiciones extremas, y tras una primera fase de activación de la autofagia, la célula parece necesitar un proceso degradativo más selectivo, en el que sólo se sacrifican las proteínas que no son vitales en estas circunstancias en beneficio de la síntesis de proteínas imprescindibles para el funcionamiento celular. Entre los substratos que se someterán a una degradación específica se conoce ya el proteosoma, principal proteasa de los sistemas degradativos citosólicos. Se ha propuesto así que, en condiciones extremas celulares, esta vía lisosómica, al intervenir en la degradación de otras proteasas intracelulares, podría controlar también la actividad de otros sistemas degradativos.

Además de este transporte intralisosómico específico también se ha descrito una secreción selectiva de péptidos desde el interior lisosómico hacia el exterior celular. Aunque aún no se conoce el mecanismo implicado, la expresión de estos péptidos en la membrana celular para su posterior reconocimiento por las células del sistema inmune vincula directamente a los lisosomas con los procesos de presentación de antígenos.

La descripción de estas vías degradativas selectivas lisosómicas está contribuyendo a modificar la vieja imagen de los lisosomas como "sacos de proteasas", para atribuirles funciones reguladoras en diversos procesos intracelulares. Por otra parte, se pone una vez más de manifiesto la existencia de un equilibrio dinámico entre los distintos sistemas degradativos intracelulares, regulado por sus múltiples interacciones, que asegura así un control estricto de este proceso fundamental celular que es la degradación proteica.

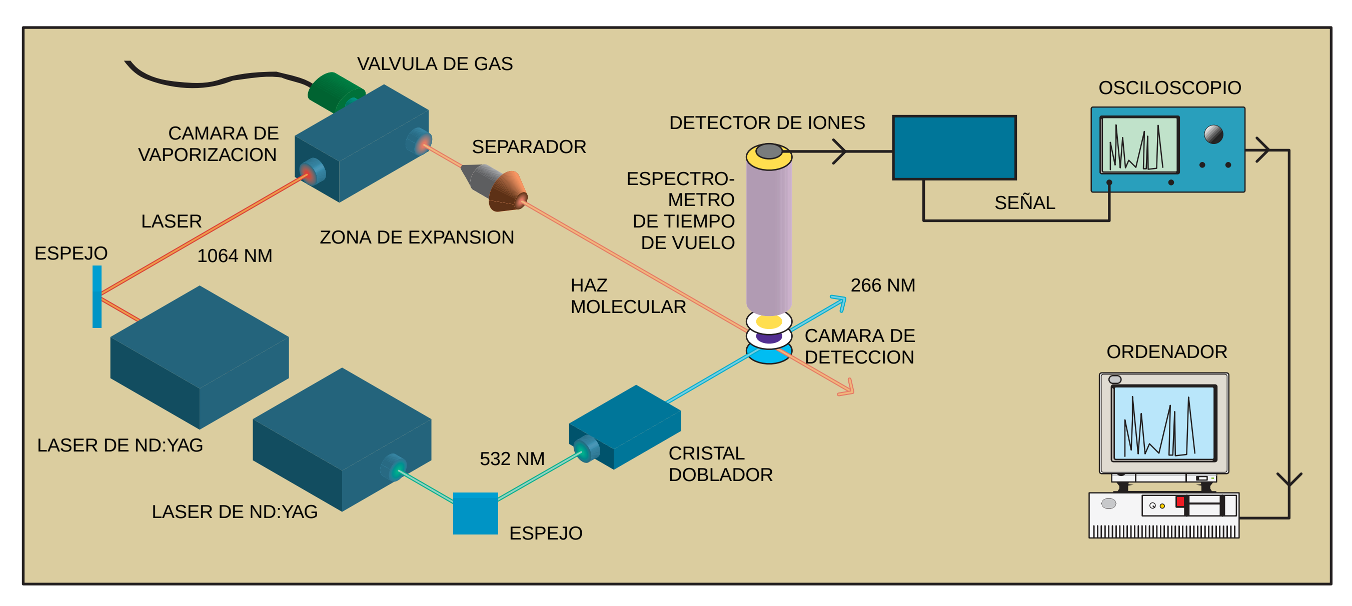
ANA MARÍA CUERVO
Departamento de Fisiología
Universidad de Tufts
Boston, EE.UU.

Innovaciones técnicas

Análisis químico por láser

El análisis de materiales, y muy en especial de muestras sólidas, es, sin duda, una de las necesidades más apremiantes de la industria moderna. Entre las técnicas principales de análisis destaca la espectrometría de masas, cuyo fundamento descansa en la separación de iones de distinta masa mediante la interacción de éstos con campos eléctricos y magnéticos. Dicha interacción depende de la relación entre la carga y la masa de los iones.

La técnica de espectrometría de masas requiere una etapa preliminar



Esquema de la técnica de vaporización y espectrometría láser puesta a punto en el laboratorio del autor en la Universidad Complutense

en que se ioniza la muestra, generalmente mediante la extracción de un electrón. En la mayoría de los casos, este proceso implica la colisión de un electrón, de suficiente energía, con la sustancia a analizar. Pero no es éste un proceso de ionización muy eficaz ni selectivo, ya que suelen ionizarse a la par otras sustancias, impurezas, presentes en la muestra, lo que perturba el análisis.

Es lógico que el desarrollo de nuevas técnicas se haya centrado en superar las limitaciones señaladas. En este sentido, quizá merezca la pena destacar el avance —todavía en pleno auge— que ha supuesto el desarrollo de técnicas basadas en la aplicación del láser para simplificar, por un lado, métodos tradicionalmente muy laboriosos y, por otro y más importante, elevar el rendimiento, selectividad y resolución en el análisis químico.

En esta dirección cabe situar la técnica de vaporización y espectrometría láser montada y puesta a punto por el equipo formado por Stefan Skovronek, Rafael Pereira y quien suscribe en la Unidad de Láseres y Haces Moleculares del Instituto Pluridisciplinar de la Universidad Complutense de Madrid. La técnica consta de una primera cámara donde se coloca la muestra sólida a vaporizar. Un láser de estado sólido envía pulsos de varios nanosegundos de duración y gran intensidad a la superficie de la muestra logrando, por ablación, vaporizar pequeñas cantidades de la misma, que, a su vez, son arrastradas por pulsos de gas inerte procedentes de la válvula de inyección. La muestra así diluida se arrastra hacia otra cámara de vacío, donde se encuentra el espectrómetro láser. Aquí se ioniza la sustancia mediante el concurso de un pulso láser de gran energía (de longitudes de onda en el ultravioleta).

Formados ya los iones, se extraen y enfocan hacia el espectrómetro de tiempo de vuelo. En él, los iones recorren una distancia de un metro aproximadamente, sin que sientan campo eléctrico alguno. En estas condiciones experimentales, los iones de masa más ligera llegan antes que los más pesados. Así pues, la medida del tiempo que tardan en llegar permite separarlos según su masa (análisis cualitativo). Por otra parte, la intensidad de cada pico nos señala la cantidad presente, una vez calibrado el espectrómetro. Todo el sistema experimental está controlado por ordenador, lo que confiere versatilidad y rapidez al trabajo, amén de facilitar el análisis de resultados.

Entre las diversas ventajas que esta técnica presenta en comparación con otros métodos analíticos caben citarse las siguientes. En primer lugar, puede usarse el sólido directamente —basta con introducirlo en forma de pastilla—, lo que evita pretratamientos químicos para la digestión o separación de los distintos componentes de la muestra, procedimientos laboriosos y no exentos de error. En segundo lugar, la muestra puede ionizarse con poca fragmentación, lo que constituye una ventaja palmaria sobre los acostumbrados espectrómetros de masas donde la ionización tiene lugar por bombardeo electrónico con una fragmentación significativa de la muestra a analizar, lo que dificulta con frecuencia su análisis.

Podemos añadir, además, la mayor selectividad en todo el proceso de análisis. Variando la frecuencia de la radiación láser —y por tanto su energía— puede ajustarse el proceso de tal manera que la especie a analizar (atómica o molecular) resulte preferentemente ionizada frente al resto de sustancias presentes en la zona de ionización. Esta característica, unida a la gran separación de iones por el considerable tiempo de vuelo, confiere a la técnica montada de espectrometría láser una resolución óptima, que se manifiesta muy útil en el análisis de isótopos. Veámoslo.

Una de las aplicaciones más recientes que se han llevado a cabo en nuestro laboratorio ha sido el análisis del contenido isotópico de litio en una muestra de hidróxido de litio. Conviene recordar que el litio se presenta de manera natural en dos formas isotópicas: el litio de masa atómica seis Li^6, con una abundancia natural del $7{,}5 \pm 0{,}2$ %, y el litio de masa 7, Li^7 con una abundancia del $92{,}5 \pm 0{,}2$ %. De estos dos isótopos, el Li^6 es un agente extraordinariamente eficaz para producir tritio, T, radiactivo por captura de neutrones según la reacción nuclear $Li^6 + n \rightarrow T + {}^4He$, reacción de extraordinaria importancia en la fusión termonuclear, donde se introduce el tritio mediante la adición de Li^6.

En los reactores nucleares se usa hidróxido de litio como agente neutralizante del ácido bórico, para compensar su acidez. El ácido bórico

es un agente especialmente adecuado para captar neutrones controlando así la reacción nuclear, y que ¡no se convierta en una bomba atómica! Por ello, el hidróxido de litio conviene que sea lo más puro posible en su contenido de isótopo 7, para evitar cualquier generación de tritio radiactivo. De ahí, pues, el interés de disponer de técnicas de gran precisión que nos permitan analizar los factores de enriquecimiento del litio en Li^7.

Con nuestra técnica se han determinado los distintos porcentajes de isótopo 6 y 7 en diversas muestras de hidróxido de litio, suministradas por empresas españolas relacionadas con la producción de energía nuclear, con error inferior al dos por mil. Estimamos, por consiguiente, que la técnica puesta a punto en nuestro laboratorios es de gran ayuda a las empresas que requieran este tipo de análisis para su funcionamiento y control de calidad. Actualmente en nuestros laboratorios se está trabajando en el desarrollo de aplicaciones para la agricultura y medio ambiente.

ANGEL GONZÁLEZ UREÑA
Director de la Unidad de Láseres y Haces Moleculares
Instituto Pluridisciplinar. Universidad Complutense, Madrid

Neurocirugía

Mapas funcionales cerebrales

Cuando un neurocirujano se dispone a practicar la resección de un tumor que se origina dentro del cerebro, dos objetivos suelen guiar su estrategia: conseguir la máxima resección y hacerlo con el mínimo daño funcional posible.

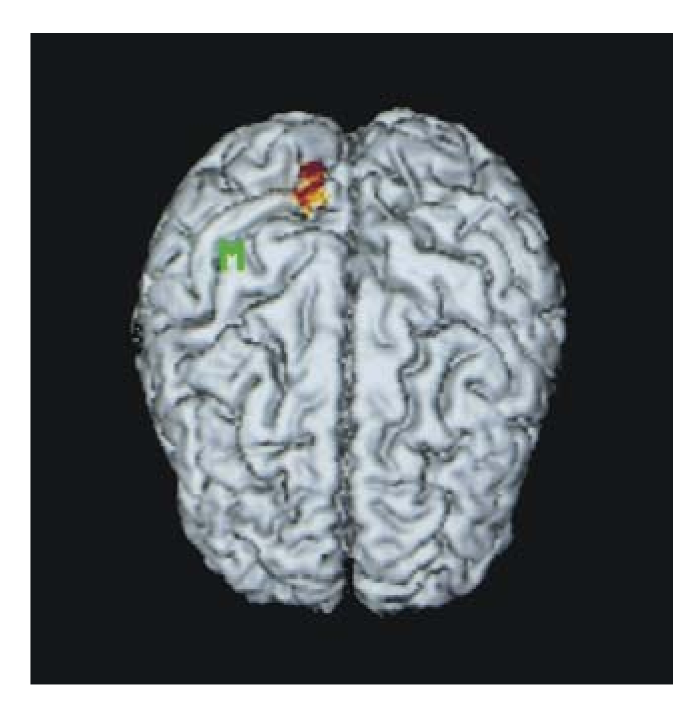
Si las resecciones quirúrgicas se realizan en la vecindad de áreas importantes para la sensibilidad y la motricidad, el lenguaje o la memoria de hechos recientes, imprescindibles esto últimos para la adquisición de nuevos conocimientos, se torna más imperiosa la necesidad de acotar con la máxima precisión posible la ubicación de las zonas esenciales de dichas funciones. La localización de las áreas cerebrales que participan en una función define lo que entendemos por mapa cerebral para la función concreta que se está estudiando.

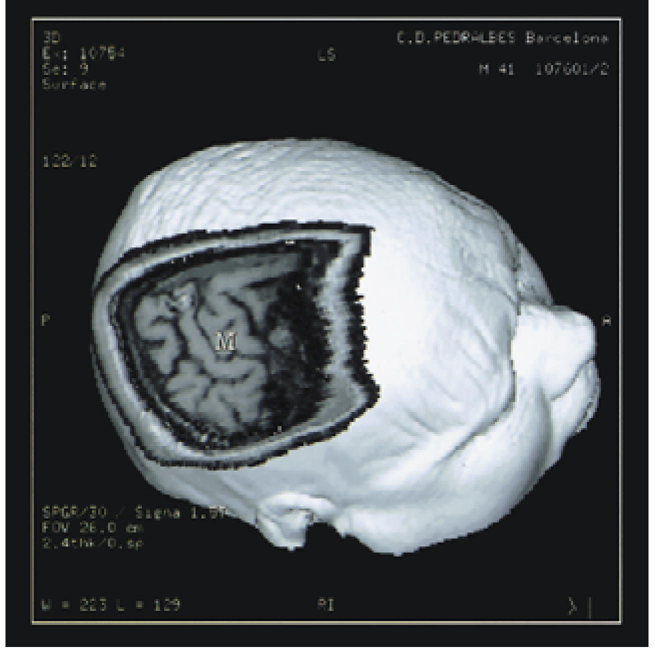
Existen diversas técnicas cartográficas no invasivas, es decir, sin riesgo para el paciente. La tomografía por emisión de positrones, la magnetoencefalografía o la más joven y menos costosa resonancia magnética funcional (RMF), aunque basadas en principios distintos, comparten el poder valorar cambios funcionales cerebrales y traducirlos en unas imágenes de activación para una determinada tarea, sea ésta visual, motora, de lenguaje o cualquier otra.

En diversos trabajos recientes, incluido el llevado a cabo por los firmantes, la exactitud obtenida, mediante resonancia magnética funcional, en la localización de las áreas sensitivomotoras primarias ha quedado demostrada en pacientes portadores de tumores cerebrales, tras comparar los datos de la RM con los resultados de la localización de las mismas áreas durante la intervención quirúrgica.

La estimulación eléctrica del córtex cerebral posibilita, bajo determinadas condiciones, localizar las áreas implicadas en determinada función. Así, cuando el estímulo se aplica en una zona primaria motora da lugar a un movimiento, en una zona primaria sensitiva a una sensación que suele describirse como de hormigueo, y en una zona visual a flashes o líneas quebradas. Debido a la complejidad de su organización, la función del lenguaje presenta una mayor dificultad de estudio. En este caso, se busca el efecto contrario, es decir, la inhibición de la función.

Cuando a un paciente se le estimula una zona relacionada con el lenguaje mientras está leyendo un texto o nombrando unas láminas que se le





Reconstrucción tridimensional, a la izquierda, de la resonancia magnética funcional motora de un paciente portador de una lesión cerebral (área anaranjada) *en la que la zona de máxima activación motora de la mano se halla por delante del mismo* (área marcada con una M en verde). *A la derecha se puede observar una reconstrucción tridimensional con una craneotomía simulada por ordenador del mismo paciente, situación muy similar a la que se va a encontrar el neurocirujano durante la intervención quirúrgica*

presentan, inmediatamente interrumpe la tarea o la ejecuta con torpeza. El punto de la corteza cerebral donde se ha aplicado este estímulo se selecciona como un punto esencial para esta función respetándose durante la cirugía. Esta técnica se considera invasiva, pues precisa de una intervención quirúrgica para su realización.

Los mapas de lenguaje que hemos confeccionado han aportado informaciones muy valiosas en muchos aspectos. En sus líneas generales recuerdan los modelos descritos en el siglo pasado por Paul Broca y Carl Wernicke. En efecto, el patrón habitual nos muestra una superficie cerebral pequeña, de 1 o 2 cm^2. El mosaico observado en la circunvolución frontal inferior y posterior suele ir acompañado de otro pequeño mosaico en la porción más posterior del lóbulo temporal dominante, en la unión de este lóbulo con el parietal. (Con todo, el esquema resultante sólo es cierto en algo más del 70 % de los casos. A veces, se presentan áreas muy extensas; otras, se detecta la ausencia de áreas frontales o temporales.)

Gracias a la nueva cartografía se han podido resecar en pacientes con tumores zonas que se consideraban intocables sin que la cirugía provoque déficits definitivos. Ese éxito demuestra, además, la variabilidad entre individuos en lo concerniente a la organización de la función del lenguaje. En el postoperatorio, y de forma transitoria, los pacientes sometidos a una intervención quirúrgica experimentan cierta dificultad para expresarse, para comprender una orden o para seguir una conversación. Tales limitaciones, que denuncian la cercanía de la resección quirúrgica a la función del lenguaje, se deben a la inflamación cerebral que se genera después de la cirugía. Hallamos un déficit similar de las funciones sensitivas y motoras cuando la resección se realiza cerca de estas áreas.

Hay en la cartografía cerebral un apartado que merece destacarse. Nos referimos al mapa de la función del lenguaje en políglotas. Si el hablante se expresa en lenguas muy alejadas, por ejemplo en chino e inglés, se ha comprobado que las áreas cerebrales activadas en un idioma suelen quedar algo separadas de las que se excitan cuando se habla en el otro. Aunque menor, de acuerdo con nuestras observaciones, puede darse también esa separación en lenguas próximas, así castellano y catalán. Esta situación implica la necesidad de realizar los mapas en todos los idiomas que hable el paciente.

Se trabaja ahora en el grado de correlación que puede existir entre la superficie cerebral de los mosaicos de lenguaje y el nivel de dominio del mismo medido con el coeficiente intelectual verbal (VIQ). Los resultados provisionales marcan ya una pauta: cuanto mayor es el control manipulativo de una lengua menor es la superficie cortical empleada.

Así pues, aunque el cerebro organiza sus funciones atendiendo a un patrón común, esa estructura varía de un individuo a otro, variabilidad que responde probablemente a razones de plasticidad neuronal durante el desarrollo y a la capacidad de manipulación de una función determinada. Habrán de aparecer nuevos métodos de estudio que permitan ahondar en esas relaciones. De momento, los disponibles encuentran ya aplicación en la asistencia de pacientes neuroquirúrgicos con lesiones cercanas a áreas motoras o de lenguaje. La cartografía cerebral comienza a ser una herramienta poderosa que orienta al neurocirujano a la hora de proceder a una resección a la medida del paciente tumoral, reduciendo así el riesgo operatorio.

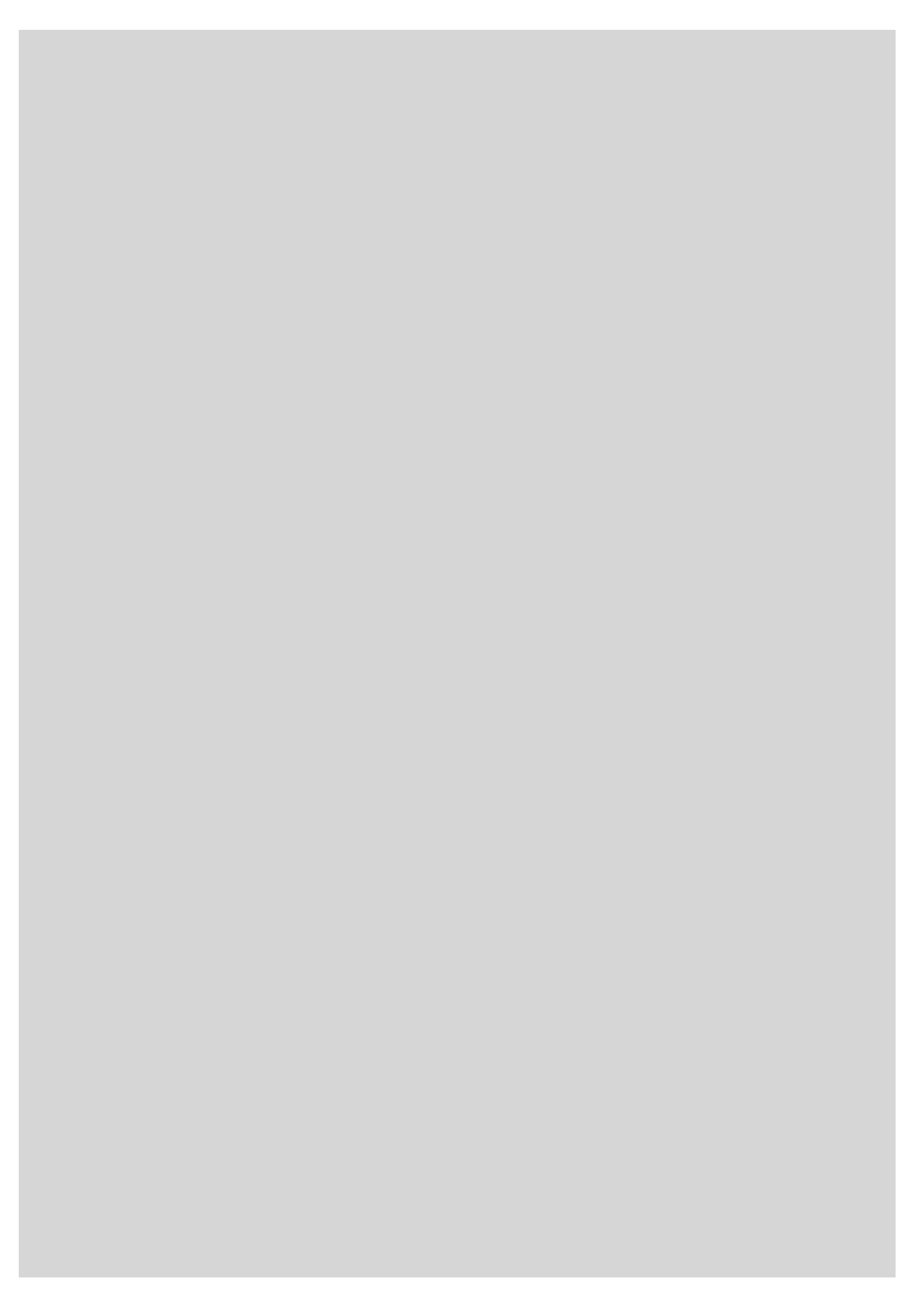
Gerardo Conesa y Jesús Pujol
Ciudad Sanitaria y Universitaria de Bellvitge
Centro de Resonancia Magnética de Pedralbes

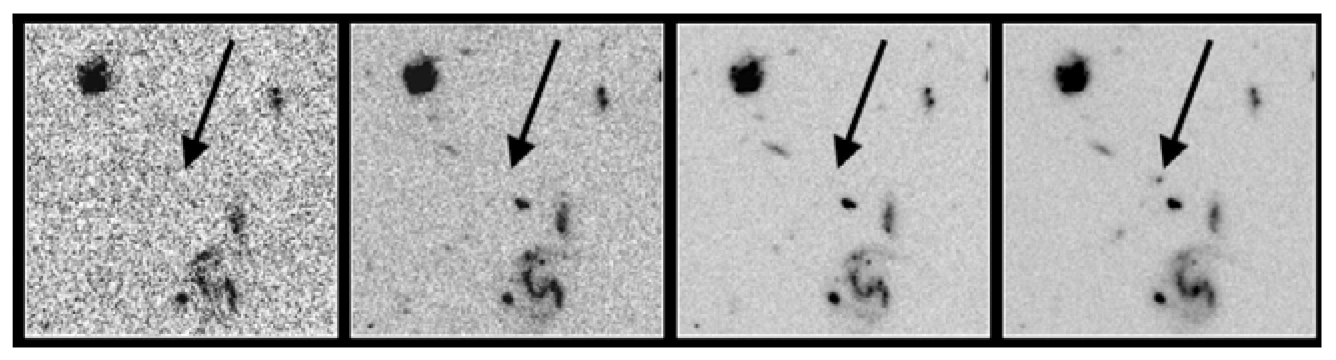
Cosmología

Formación estelar en galaxias muy lejanas

El afán por descubrir objetos lejanos viene guiando, desde sus comienzos, el desarrollo de la astronomía. Los pasos dados desde la invención del telescopio nos han llevado cada vez más lejos. Hemos salido de nuestro planeta para comprobar la existencia de otros mundos cercanos, descubriendo a continuación que otras estrellas pueden albergar otros planetas. Ya en nuestro siglo, hemos observado nuevas galaxias de lejanía creciente.

Las unidades usadas para medir distancias no nos sirven si hablamos de objetos remotísimos, tanto, que la luz tarda en recorrerlas tiempos comparables a la edad del universo. Cuando tal ocurre, utilizamos por unidad de medida el corrimiento hacia el rojo (z) observado en la radiación que nos





Galaxia distante en la imagen de Campo Profundo. *La figura muestra la más brillante entre las galaxias más lejanas, tal como se observa a través de los cuatro filtros utilizados (mayor corrimiento hacia el rojo a la derecha)*

llega de tales objetos. El corrimiento se debe al efecto conjunto de la ley de Hubble y el efecto Doppler. De acuerdo con la primera, cuyo nombre honra la memoria del astrónomo norteamericano Edwin Powell Hubble, todos los objetos del universo se están mutuamente distanciando, a mayor velocidad cuanto más lejanos. El efecto Doppler, así llamado en honor del físico austríaco Christian J. Doppler, establece que la longitud de onda a la que observamos la radiación emitida por un cuerpo crece en función de la velocidad de alejamiento de nosotros.

Para movernos con soltura, demos un cuadro de referencia: un objeto cercano (en escala cosmológica) tiene corrimiento al rojo $z = 0$, el fondo cósmico de microondas nos llega desde $z = 1500$, y el instante de la gran explosión corresponde a z igual a infinito. El modelo cosmológico estándar permite traducir esta escala a tiempo. Por ejemplo, si el valor de z es 5, ese guarismo viene a corresponder al momento en que el cosmos tenía el 7 % de su edad actual; si el valor de z fuera 1, nos habríamos trasladado a una época en que la edad del universo correspondería al 35 % de la presente. Hablar del "hoy" equivale, en esta escala, a $z = 0$.

Tradicionalmente, los reyes del universo lejano han sido los cuásares. Estos objetos, a diferencia de las galaxias "normales", emiten ingentes cantidades de radiación en todo el rango de longitudes de onda. Se ha detectado la presencia de cuásares hasta valores de z de 4,9.

No obstante, en los últimos años los avances en la observación de galaxias normales distantes han sido espectaculares. Técnicas de observación basadas en la tendencia de las galaxias a agruparse entre sí y alrededor de los cuásares han permitido descubrir galaxias con valores de z que se aproximan a 3,5.

Para registrar galaxias aún más lejanas podemos basarnos en la detección de absorción por hidrógeno neutro (HI). Este átomo produce la absorción total de la radiación con longitud de onda en reposo menor de 912 angstroms (correspondiente a la energía de ionización del hidrógeno). Dado que la propia galaxia emisora contiene ese átomo, en el espectro de la misma se observará una fuerte caída de flujo —un "corte"—a la mencionada longitud de onda, que hará que la galaxia resulte "invisible" si la contemplamos en longitudes de onda menores.

Ahora bien, el corrimiento hacia el rojo de la radiación provoca que la longitud de onda aparente a la que se produce la absorción sea mayor para nosotros, observadores lejanos. Así, puesto que la longitud de onda observada (λ') se relaciona con la emitida (λ) y con el valor de z según la fórmula $\lambda' = \lambda(1 + z)$, se tiene que, para una galaxia con z igual a 3, el corte en su espectro se producirá a una longitud de onda de aproximadamente 3600 angstroms, y para una galaxia a $z = 5$, a unos 5500 angstroms.

Además, si el valor del corrimiento hacia el rojo o recesión de la galaxia es mayor que 3, habrá que tomar en consideración la densidad de HI en el medio intergaláctico. Esa densidad es tal, que la absorción se produce también para longitudes de onda en reposo menores que 1216 angstroms (la que corresponde al salto del nivel base al primer estado excitado del átomo de hidrógeno). Así pues, en el caso de la galaxia a $z = 5$ el espectro de la misma observado presentará una ausencia total de flujo por debajo de los 7300 angstroms.

Basados en estos fundamentos físicos, podemos detectar galaxias lejanas. Para ello se toman imágenes de un campo con varios filtros anchos. Los objetos que aparecen brillantes en la banda roja y que no se observan en las bandas azules son candidatos a galaxias de alto z. Además, el valor de z puede calcularse de forma aproximativa utilizando el valor de la longitud de onda intermedia entre la del filtro en que la galaxia se ve (más rojo) y aquel en el que no se percibe (más azul), y comparándolo con la longitud de onda a la que se produce la absorción en reposo, los ya nombrados 1216 angstroms.

Conjuntamente con Kenneth M. Lanzetta y Amos Yahil, de la Universidad estatal de Nueva York, hemos aplicado este método a la detección de galaxias lejanas en las imágenes del *Campo Profundo* tomadas por el telescopio espacial Hubble en diciembre de 1995. Estas imágenes corresponden a una zona del cielo de unos 3×3 minutos de arco. Para obtenerlas se emplearon cuatro filtros anchos, centrados en 3000, 4500, 6060 y 8140 angstroms respectivamente, con un tiempo de exposición total de unos diez días. Teniendo en cuenta el efecto explicado con anterioridad, una galaxia detectada en el filtro más rojo, pero no en los otros tres, debería tener un valor de z que cumpla que $\lambda' = 7000$, o, lo que es lo mismo, que $7000 = 1216(1 + z)$; esto es, el corrimiento hacia el rojo sería aproximadamente 5.

Empezamos por la detección de los objetos en la imagen más roja (8140 angstroms). Confeccionamos así una lista de 1104 galaxias con magnitudes observadas $AB(8140) < 28$. (El sistema de magnitudes AB se define de modo que una fuente con espectro plano —i.e., $f_\lambda(\lambda) = \text{constante}$— tiene la misma magnitud AB en todos los filtros.) El catálogo mostraba una altísima densidad superficial de galaxias, ya que las imágenes son mucho más profundas que cualquier otra tomada con anterioridad. A continuación, obtuvimos la medida de sus flujos en cada una de las cuatro bandas disponibles, lo que nos permitió representar la distribución espectral de energía para

cada una de ellas. Esta distribución viene a constituir una suerte de espectro de muy baja calidad, con tan sólo cuatro datos en el rango de los 3000-9000 angstroms.

Generamos luego un conjunto de distribuciones espectrales para galaxias de diversos tipos morfológicos (desde elípticas hasta irregulares) con valores de corrimiento hacia el rojo que cubren el rango desde $z = 0$ hasta $z = 8$, teniendo en cuenta el efecto de la absorción por HI. Comparando cada una de las 1104 distribuciones observadas con estas distribuciones modelo, podemos decidir cuál es la que da un mejor ajuste y, en consecuencia, asignarle a la galaxia el valor de z correspondiente.

Se obtiene así una lista de valores estimados de z para los objetos. La característica más interesante de esta lista es que aparecen 30 galaxias con valores de z entre 4 y 5, dos con z entre 5 y 6, y cuatro para las que obtenemos una cota inferior $z > 6$. No sólo todas estas galaxias son más lejanas que cualquier galaxia normal identificada con anterioridad, sino que también varias de ellas superan la marca de $z = 4{,}9$ correspondiente al cuásar más lejano conocido hasta la fecha.

Podemos rechazar la objeción de que las galaxias detectadas a alto z correspondan en realidad a otro tipo de objeto astronómico: ningún otro objeto conocido presenta una discontinuidad tan fuerte en su flujo, capaz de justificar la diferencia observada. Otra posibilidad, la de que los objetos correspondan a galaxias normales cercanas muy enrojecidas, se descarta por inspección de las imágenes infrarrojas que el equipo de L. Cowie ha tomado del mismo campo utilizando el telescopio Keck, del observatorio de Hawai.

Quizás el rasgo más destacado de las galaxias lejanas que hemos detectado resida en su normalidad. Sus tamaños y luminosidades coinciden con los que serían de esperar para muchas de las galaxias cercanas menores. Además, la radiación que detectamos en la banda de 8140 angstroms corresponde en su propio sistema de referencia al ultravioleta, lo que nos indica que estos objetos atraviesan una etapa de intensa formación estelar.

Dentro del modelo cosmológico de Einstein-de Sitter (con $\Omega = 1$ y $\Lambda = 0$) el valor de $z > 6$ corresponde en escala temporal al momento en que el universo tenía menos del 5 % de su edad actual. Dicho de otro modo: estamos observando tales galaxias en la forma que presentaban cuando el universo tenía sólo unos 500 millones de años, si damos a la constante de Hubble un valor de 100 kilómetros por segundo y por megaparsec. Dado que este período de tiempo viene a ser el tiempo dinámico de formación de estructuras de semejante tamaño, deducimos que estamos asistiendo a los primeros brotes de formación estelar en fragmentos de galaxias recién constituidas, o bien que estamos observando formación estelar en estructuras subgalácticas durante su colapso hacia la generación de las primeras galaxias.

Alberto Fernández Soto
Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC)
Depto. de Física Moderna.
Universidad de Cantabria

Rayos bola

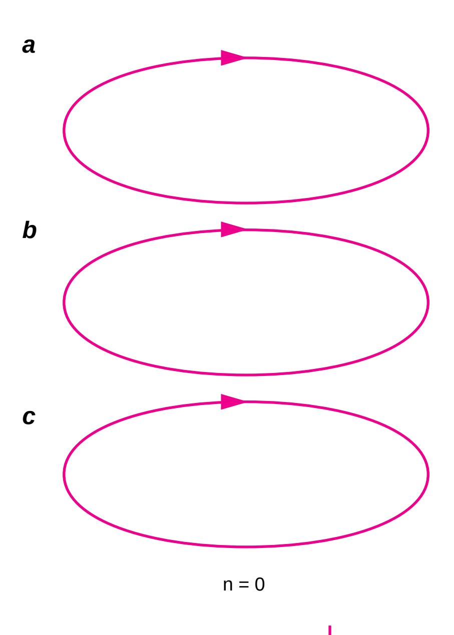
Solución del enigma

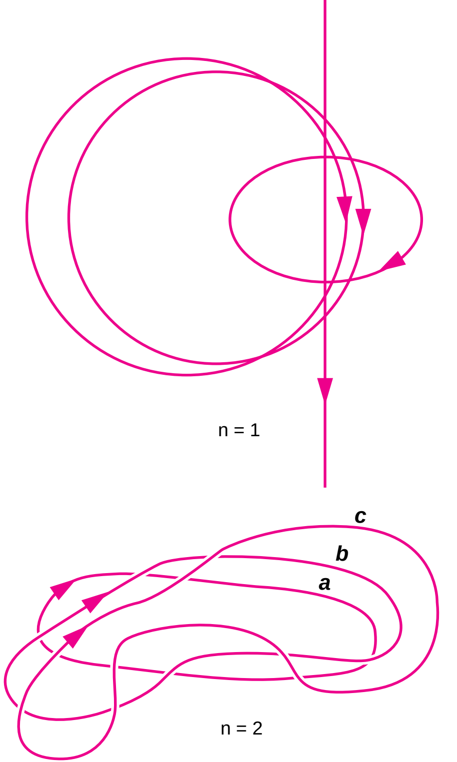
Desde muy antiguo se oyen relatos sobre bolas de fuego aparecidas en tormentas. Quienes las han visto las describen como esferas fulgurantes y espectaculares, casi siempre de color rojo intenso o blanco brillante, a veces verde o azul.

Aunque suelen estar asociadas a los rayos normales, los llamados rayos en bola o rayos bola son muy distintos: se mueven casi siempre de modo lento y majestuoso, predominantemente en horizontal y duran varios segundos, hasta treinta o incluso más de un minuto. Los hay que terminan en una explosión, pero muchos se apagan de modo suave. Su tamaño típico es de 25-30 cm de diámetro, aunque se han descrito de hasta 10 m y más.

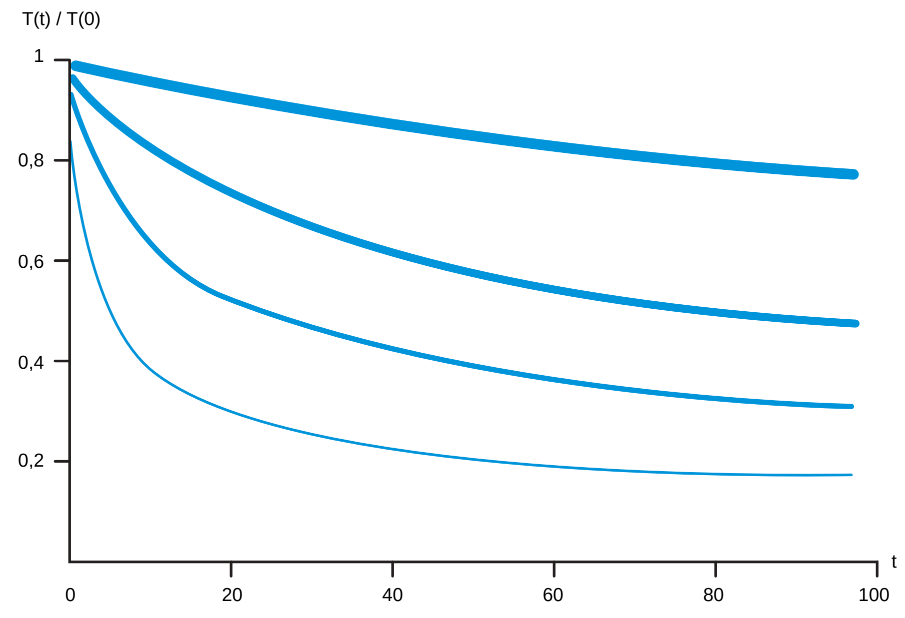
El fenómeno ha intrigado a los científicos, que no acaban de hallar una explicación. Dos buenas razones justifican esa tenaz resistencia. Sin duda no es cosa simple; muy probablemente se trata de una configuración de casi equilibrio de un gas ionizado en interacción con un campo electromagnético. Además, es muy raro e imprevisible —se estima que se produce uno por cada más de mil rayos normales—, y por eso es tan difícil su estudio experimental: no se puede tener preparado un laboratorio en el lugar y tiempo adecuados. Por otra parte, los intentos de provocarlo en un laboratorio han fracasado, excepto algunas bolas producidas por combustión de aerosoles y otras con microondas por dos japoneses, que no está claro sean la misma cosa.

Los testigos no suelen tener formación científica y sus relatos son confusos y contradictorios. Algunos dicen que es frío y que lo han tocado sin quemarse, pero los hay que han sufrido quemaduras y otros han visto cómo producían incendios. Hay informes de que entran en las habitaciones a través de las ventanas cerradas sin dejar rastro en ellas, otros de que





1. Representación esquemática de líneas de fuerza, en los casos sin enlace (n = 0) y con enlaces n = 1 y n = 2



2. Evolución de la temperatura de una bola para n = *0, 2, 4, 10* (de menor a mayor grosor de línea). *Se aprecia que las bolas más enlazadas se enfrían más despacio*

se mueven contra el viento. Mientras que la inmensa mayoría se han visto durante una tormenta, los hay también observados en tiempo claro. No es de extrañar que muchos hayan opinado que no son más que ilusiones ópticas; pero las más abundantes observaciones recientes hacen que su existencia esté fuera de toda duda. Sin embargo ninguna de las más de una docena de teorías propuestas es aceptada como buena (basadas en muy variados efectos: microondas, reacciones químicas o nucleares, combustión de aerosoles, meteoritos de antimateria, nuevos estados de la materia, etcétera). Se considera como el último fenómeno natural que no tiene todavía explicación científica.

El problema está en explicar cómo es posible que su movimiento sea casi siempre horizontal. Pues su gran brillo parece indicar que, sea lo que sea, está muy caliente y debería expandirse y enfriarse muy deprisa; los cálculos predicen que el proceso sólo debe durar centésimas de segundo o poco más. Además, al disminuir su densidad la bola debería ascender. O sea, que lo esperable sería ver bolas explotando hacia arriba en una fracción de segundo (por esta razón Faraday creía que eran meras ilusiones ópticas). Debe haber, pues, alguna fuente de fuerza centrípeta o de presión capaz de mantener la bola apretada durante un largo tiempo. Pero, como no se encuentra, hay científicos partidarios de que es más bien un objeto frío, apoyándose en algunos relatos de testigos. Ante tanta dificultad, hay quien opina que bajo el mismo nombre se agrupan fenómenos distintos no explicables por un solo modelo a la vez.

La cuestión no carece de importancia. Si la cosa está caliente, la naturaleza habría resuelto un problema de confinamiento —cómo mantener muy caliente a un plasma—, análogo al que frena el desarrollo de la energía por fusión. Necesitaríamos conocerlo.

En una carta publicada recientemente en la revista *Nature*, propuse con J. L. Trueba una solución al enigma: las bolas pueden ser esferas de plasma sujetas por nudos electromagnéticos, es decir, por configuraciones del campo electromagnético tales que dos líneas magnéticas (o eléctricas) cualesquiera están enlazadas. Se dice de ellas que tienen helicidad porque las líneas de fuerza se enrollan unas alrededor de las otras. Cada nudo viene caracterizado por dos números enteros, n y m, que indican el grado de los enlaces magnético y eléctrico, respectivamente. Se trata de soluciones de las ecuaciones de Maxwell estudiadas por A. F. R. en 1990. Michael Berry sugirió en 1995 la posibilidad de construir con ellos un modelo de rayo bola.

Los rayos normales ionizan aire a su alrededor. En la versión más simple del modelo, si se forma una bola con un nudo magnético (o sea sin campo eléctrico, por simplicidad) y número de enlace n, y la temperatura es suficiente para poder prescindir de los efectos resistivos, entonces se conservan los enlaces (no hay reconexión de líneas), lo que impide la expansión explosiva que cabría esperar. En la aproximación magnetohidrodinámica hay entonces soluciones con las líneas de velocidad del plasma igual de enlazadas que las magnéticas, resultando que una estructura tan enredada es mucho más estable que una que no lo esté. Suponiendo que una bola radia según la ley de Stefan (o radiación de cuerpo negro), el cálculo muestra que su expansión es lenta, mientras que la temperatura decrece como la inversa de su radio al cuadrado. Además el tiempo característico es proporcional a $n^2 + 1$. En otras palabras, que crece cuadráticamente con el número de enlace, de modo que la bola dura más cuanto más enlazada está. El enlace proporciona algo así como una presión que alarga la vida de la bola. Si por ejemplo $n = 10$, el factor de amplificación temporal es 101.

Cabe mencionar que si se inyecta helicidad en un reactor de fusión tokamak, introduciendo en él lo que se llama un esferomak, es decir, una esfera de plasma con helicidad, se consigue sostener el plasma durante más tiempo. O sea, que quizás ocurran cosas parecidas en los rayos bola y en los plasmas de fusión. Una de ellas puede ser que una botella magnética con enlace es mucho más eficaz para confinar un plasma que otra no enlazada.

Antonio F. Rañada
Universidad Complutense

Plagas de cereales

Parásitos fúngicos

Saben muy bien los campesinos quiénes son los principales enemigos de sus cosechas: los hongos. En el caso de los cereales, por ejemplo, se ha estimado que el 27 % de las pérdidas debe atribuirse a esos patógenos. Nada tiene, pues, de extraño que la mayoría de los estudios consagrados a los hongos patógenos de las plantas se hayan realizado en sistemas agrícolas.

Pero esos parásitos tienen otra vertiente positiva. Influyen en la dinámica poblacional de muchas especies de plantas cultivadas, causando la muerte de los individuos infectados o bien reduciendo la producción de semillas. Pese a ello, apenas si se han investi-

gado las interacciones en condiciones naturales entre patógenos y sus plantas patrón, gramíneas sobre todo.

Creíase que la simplicidad ecológica y genética de los sistemas agrícolas, es decir, monocultivos extensivos con uniformidad genética, constituía la causa de su vulnerabilidad a enfermedades. Opinión que se completaba con la idea de que en los sistemas naturales rara vez ocurrían las epidemias de patógenos, si es que la interacción entre patógenos y hospedadores no tejía una asociación benigna. Gracias al avance de la investigación ha quedado ahora demostrado que las epidemias son un fenómeno común y que los patógenos afectan negativamente a sus plantas hospedadoras.

Lo mismo que otros vegetales, las gramíneas sufren ataques muy diversos por patógenos de distinta índole. Se calcula que un cultivo puede verse amenazado en promedio por un centenar de enfermedades. El maíz, por ejemplo, se halla expuesto a más de 60 enfermedades de etiología fúngica. El alcance de la enfermedad dependerá de la fase del ciclo de vida del hospedante en que se produzca la infección, de la longitud del ciclo de vida (carácter anual o perenne de la planta) y del órgano atacado (hojas, raíces u órganos de la reproducción). La enfermedad puede acarrear una reducción de la esperanza de vida, un menor desarrollo del vegetal o la producción frustrada de semillas, entre otros efectos. En particular, la disminución en la fecundidad puede deberse al ataque directo de los órganos florales o embriones en desarrollo.

Hasta la fecha, los estudios de sistemas naturales se centraban en las enfermedades que provocaban lesiones locales o con efectos devastadores en los hospedadores: mildius y algunas royas. Apenas si había alguien que investigara los patógenos sistémicos; así se denominan los dotados de capacidad para diseminarse internamente a través de los tejidos e infectar la planta entera. Ello resultaba particularmente cierto en el caso de las gramíneas, familia muy expuesta a la agresión patogénica.

Entre los hongos patógenos, los carbones florales ocupan un lugar destacado. Atacan a casi todas las especies de cereales. Tornan estériles las plantas parasitadas al destruir las estructuras reproductivas femeninas y reemplazar las anteras de las plantas infectadas con esporas del hongo. Especies de carbón que infectan pastos no se limitan a destruir las inflorescencias, sino que acortan también la esperanza de vida y frenan el crecimiento de las plantas atacadas. Los hongos patógenos que no son sistémicos agreden sobre todo las hojas y pueden afectar la fecundidad, crecimiento y competencia; es el caso, por ejemplo, del mildiu *Erysiphe graminis*, que infecta cultivos de cebada.





Síntomas de la infección causada por el carbón sistémico Ustilago cynodontis *en su pasto hospedador* Cynodon dactylon*. A la izquierda, inflorescencias sanas; a la derecha, inflorescencias infectadas*

Los trabajos sobre interacciones entre monocotiledóneas y patógenos sistémicos se han ceñido, por lo común, a pastos anuales de interés agronómico. Y la investigación apenas trascendía los efectos de los patógenos en la productividad de los cultivos. No se abordaba, por ejemplo, la adaptación darwinista de las plantas hospedadoras. Ello explica el desconocimiento que existe a propósito de la incidencia de estas enfermedades en poblaciones naturales y su efecto en la biología de las plantas afectadas; de esa ignorancia general se salvan algunos estudios, realizados en Australia, sobre la distribución espacial y temporal de la incidencia del carbones florales en poblaciones de pastos nativos, además de ciertos trabajos estadounidenses sobre hongos endófitos de gramíneas.

Los patogenos fúngicos sistémicos ocupan, en su mayoría, una posición intermedia entre los no sistémicos, altamente agresivos, y los hongos que se acercan a un estado simbiótico. Entre estos simbiontes podríamos incluir los endófitos. Algunos patógenos sistémicos que atacan a los pastos, además de provocar infertilidad al sustituir partes florales con estructuras fúngicas, incrementan el vigor vegetativo de las plantas infectadas; otros no alteran la capacidad competitiva de los individuos enfermos.

En resumen, debido a la amplia diversidad de patógenos existentes y a la escasez de información acumulada sobre sus efectos en las gramíneas, resulta arriesgado establecer generalizaciones sobre sus interacciones ecológicas. Parece evidente, sin embargo, que el alcance de la enfermedad provocada no sólo está determinado por la identidad del patógeno, sino también por el ciclo vital del hongo y de la planta parasitada.

GRACIELA GARCÍA-GUZMÁN
Instituto de Ecología,
UNAM, México

De cerca

Fotos y texto: Albert Masó

Segmentos de la oruga

Las orugas, fase larval móvil de los lepidópteros, tienen una estructura segmentada, que refleja la compartimentación característica de los insectos. Presentan el cuerpo dividido en cabeza y segmentos, tres de los cuales son torácicos y diez, abdominales. En su cabeza, globular, reside la mayoría de los órganos sensoriales. Cada segmento del tórax posee un par de patas articuladas y muy quitinizadas que terminan en una uña. Tras la metamorfosis pupal, esas patas pasarán a ser las de la mariposa adulta, en tanto que los pseudopodios de los anillos abdominales desaparecerán, reabsorbidos, en la crisálida.

Los pseudopodios no son patas, sino expansiones membranosas de la cutícula que terminan en una ventosa y una corona de pequeños ganchos. Estructuras que les permiten una segura fijación a la planta nutricia. No se trata de una adaptación menor. Antes bien, les va en ello la vida. Siempre hay algún depredador (ave, roedor o insecto) que está al acecho de su caída.

La oruga respira por los estigmas. Están en la mayoría de los segmentos. El oxígeno que entra por esos orificios circula a través de una red interior de tubitos ramificados que alcanzan a todos los órganos y tejidos. Esta comunicación directa con la atmósfera produce una pérdida de agua por evaporación; si no se controlara, acabaría por deshidratar al individuo. Para evitarlo, los estigmas tienen un sistema de cierre y apertura según interese respirar o evitar la evaporación.

Técnica fotográfica: La fotografía inferior se tomó con un objetivo de fotomacrografía de 55 mm de distancia focal, a un ratio (relación de producción) de 1/3, con un diafragma f. 11 para obtener la suficiente profundidad de campo. En estas condiciones, la velocidad de obturación era demasiado baja para fijar el movimiento de la oruga, por lo que se usó un flash anular colocado en la parte frontal del objetivo. La fotografía superior ya tiene un ratio de 2; fue, pues, necesario separar el objetivo con un tubo de extensión que mantuviese la transmisión del valor del diafragma. Entonces, la distancia de trabajo (separación entre el objetivo y la oruga) era tan pequeña (unos 3 cm), que el ángulo de cobertura del flash anular resultaba insuficiente. Hubo, pues, que iluminar con un flash normal separado del cuerpo de la cámara, con un ángulo de incidencia de unos 30º. E1 diafragma usado era f. 22; la profundidad de campo disminuye mucho a ratios tan altos.



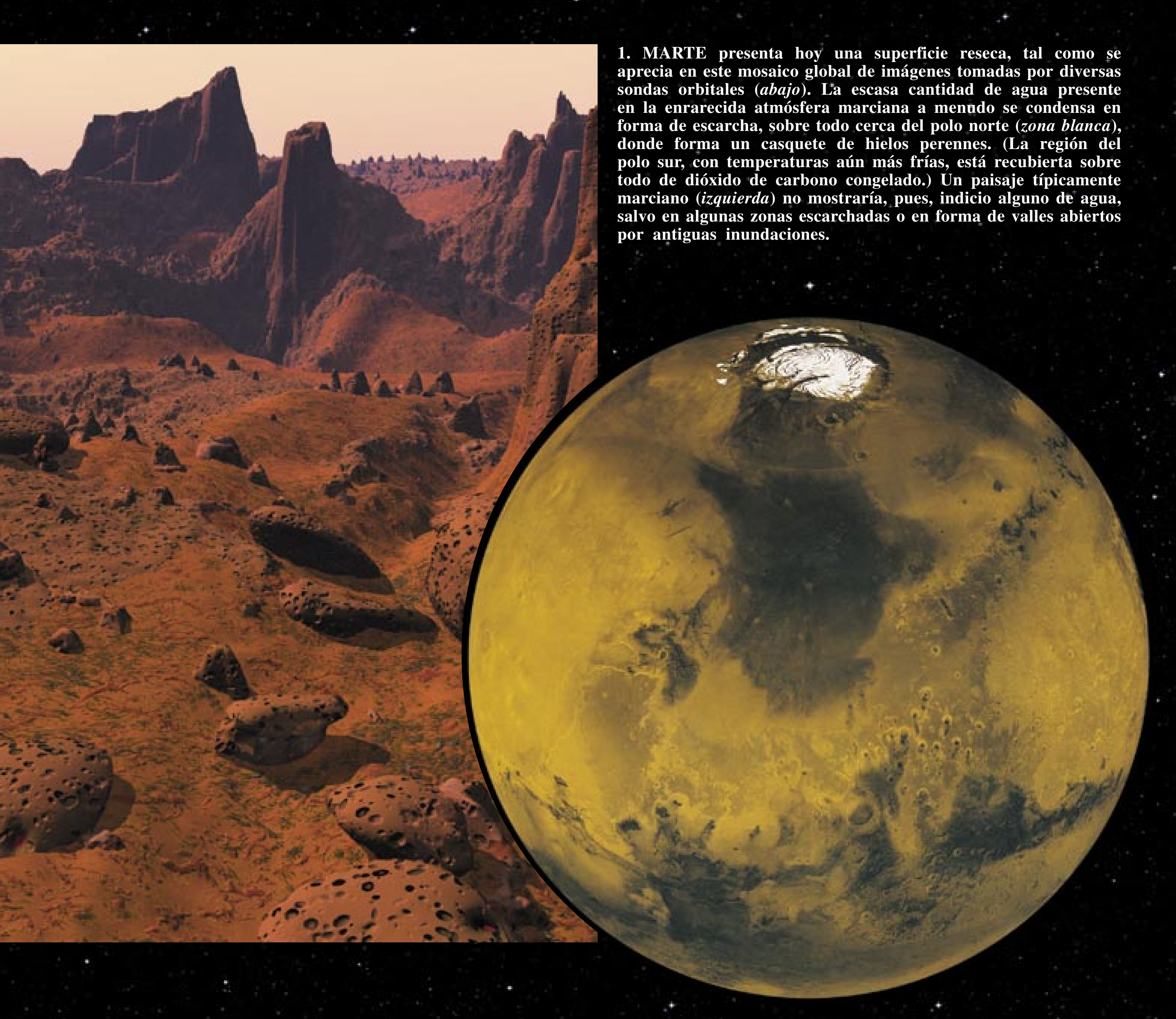


Cambio climático global en Marte

Marte es hoy un mundo helado. Hubo, sin embargo, en su historia momentos de mayor templanza, con ríos y mares, con glaciares fundidos y, quizá, vida en abundancia

Jeffrey S. Kargel y Robert G. Strom

Nos ha impresionado mucho, a los que hemos dedicado buena parte de nuestra vida al estudio de Marte, que se hayan encontrado recientemente en una roca desprendida del planeta indicios de que quizá vivieron en ella microorganismos extraterrestres. Pero la noticia nos ha traído también el recuerdo de Percival Lowell, astrónomo estadounidense de principios de este siglo que apuntó su telescopio a Marte y vio una vasta red de canales bordeados por vegetación. Como Marte, según él, albergaba tal exuberancia, muchos creyeron que reinaban en su superficie condiciones no muy diferentes de las terrestres. En los años sesenta tres sondas *Mariner* se acercaron al planeta y mostraron la verdadera aridez del medio.



1. MARTE presenta hoy una superficie reseca, tal como se aprecia en este mosaico global de imágenes tomadas por diversas sondas orbitales (*abajo*). La escasa cantidad de agua presente en la enrarecida atmósfera marciana a menudo se condensa en forma de escarcha, sobre todo cerca del polo norte (*zona blanca*), donde forma un casquete de hielos perennes. (La región del polo sur, con temperaturas aún más frías, está recubierta sobre todo de dióxido de carbono congelado.) Un paisaje típicamente marciano (*izquierda*) no mostraría, pues, indicio alguno de agua, salvo en algunas zonas escarchadas o en forma de valles abiertos por antiguas inundaciones.

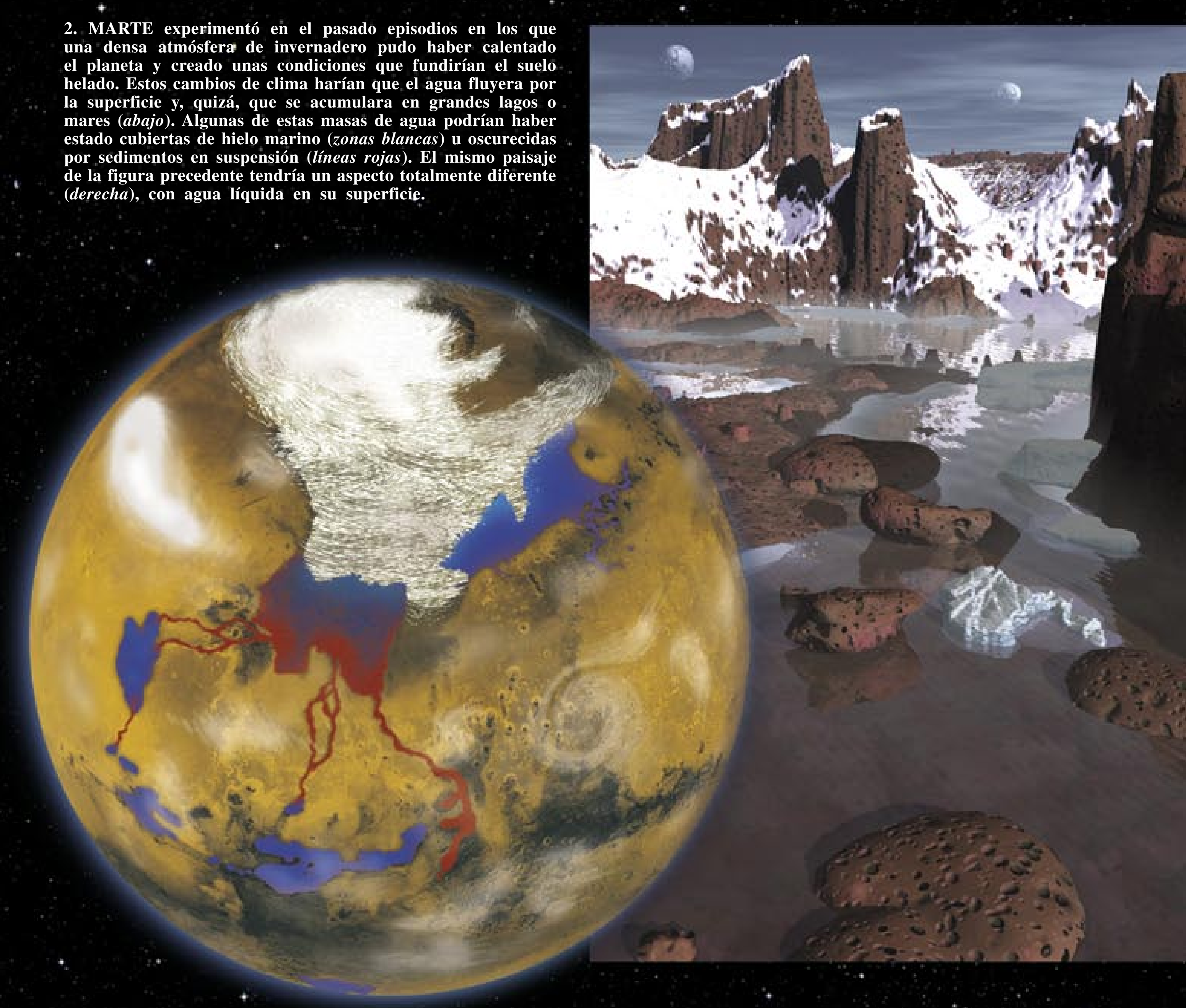
Gracias a las observaciones de aquellos satélites no tripulados se supo que la atmósfera de Marte es fría, seca y está enrarecida. Ese tenue velo, compuesto casi en su totalidad por dióxido de carbono, crea en la superficie una presión que es inferior al uno por ciento de la registrada en la Tierra a nivel del mar. Las imágenes que hace treinta años, durante aquellos breves encuentros, radiaron las sondas *Mariner* fueron pocas y borrosas, pero mucho más precisas que las captadas por Lowell con su telescopio. Las cámaras instaladas a bordo no vieron canales, ni agua, ni vegetación; tan sólo una superficie lunar, cubierta de cráteres. Hubo, pues, que empezar a descartar que el clima de Marte fuese lo bastante cálido o húmedo para acoger la vida.

Con una órbita tan distante —está un cincuenta por ciento más lejos del Sol que la Tierra— y un manto atmosférico finísimo el clima de Marte es gélido. Las temperaturas medias en la superficie suelen ser de –60 grados C en el ecuador; cerca de los polos bajan hasta los –123 grados. Sólo el sol de mediodía a latitudes tropicales calienta lo suficiente para que se produzca un deshielo ocasional, pero la baja presión atmosférica evapora esa agua casi al instante.

Aunque la atmósfera encierra una pequeña cantidad de agua y a veces se producen nubes de agua y hielo, el clima marciano se caracteriza por las tormentas de arena o los vendavales de dióxido de carbono. Cada invierno, por ejemplo, una ventisca de dióxido de carbono helado azota uno de los polos y, a medida que en el casquete polar opuesto se evapora el dióxido de carbono helado, se acumulan varios metros de esa nieve de hielo seco. Pero ni siquiera en el polo donde es verano y el sol luce en el cielo todo el día las temperaturas suben tanto que se derrita el agua helada.

Pese a la riqueza de indicios que muestran la frialdad y sequedad de Marte, la impresión de que ha sido siempre un mundo glacialmente seco no ha dejado de debilitarse desde los días de las naves *Mariner*. Los expertos en planetología siguen examinando la ingente cantidad de datos que esas sondas, y también las *Viking* —en los años setenta—, aportaron. Han llegado a la conclusión de que Marte ha tenido una historia climática compleja, salpicada quizá

2. MARTE experimentó en el pasado episodios en los que una densa atmósfera de invernadero pudo haber calentado el planeta y creado unas condiciones que fundirían el suelo helado. Estos cambios de clima harían que el agua fluyera por la superficie y, quizá, que se acumulara en grandes lagos o mares (*abajo*). Algunas de estas masas de agua podrían haber estado cubiertas de hielo marino (*zonas blancas*) u oscurecidas por sedimentos en suspensión (*líneas rojas*). El mismo paisaje de la figura precedente tendría un aspecto totalmente diferente (*derecha*), con agua líquida en su superficie.



por frecuentes episodios hasta cierto punto templados. En algunas épocas fluyeron libremente por su superficie enormes cantidades de agua. Antes de considerar el significado que ello encierra, por lo que se refiere a la posibilidad de que haya habido vida en Marte o a la estrategia a seguir en la próxima ronda de exploraciones marcianas, será de interés repasar por qué se produjo este cambio en nuestra percepción de Marte.

Un pasado turbio

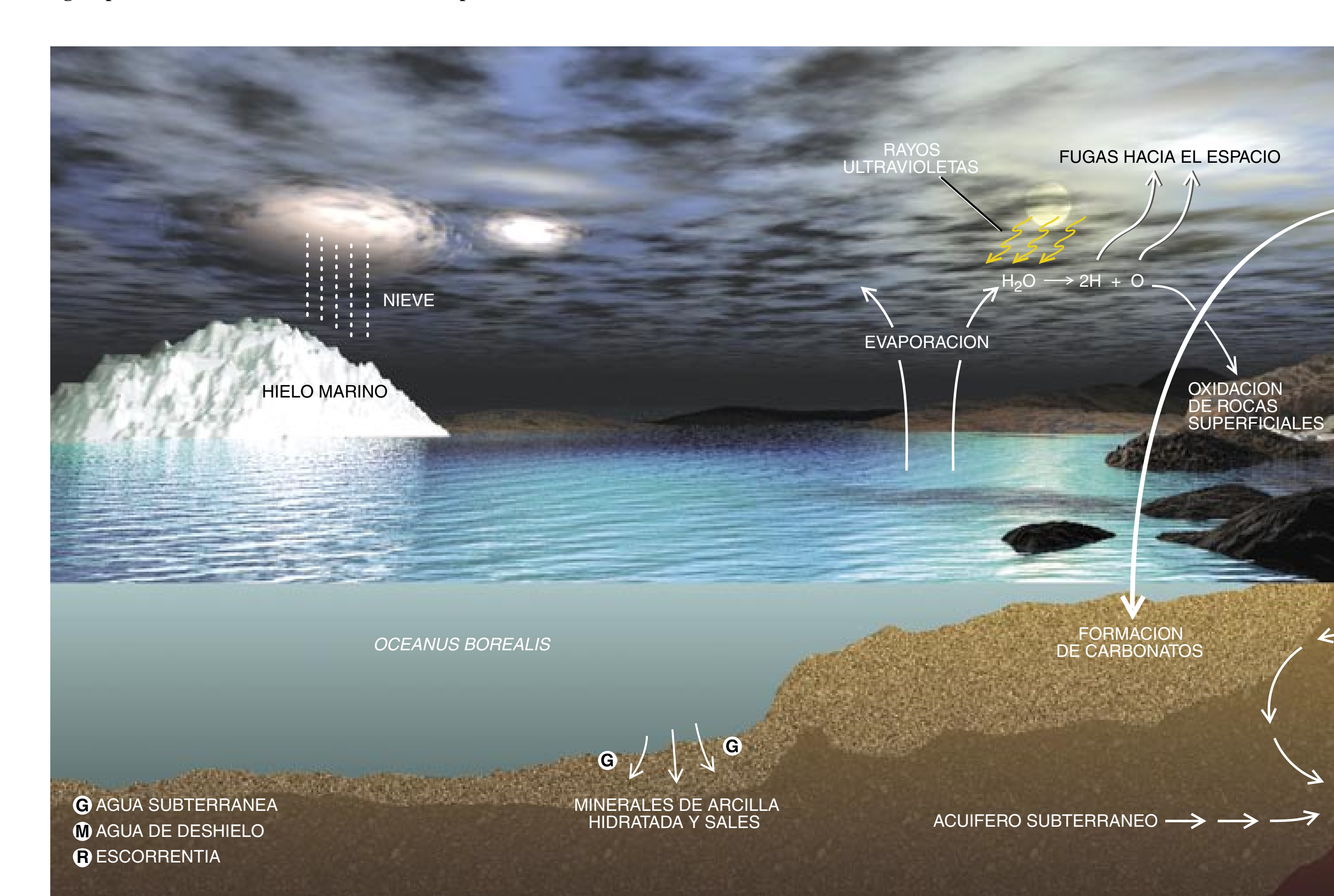
Al analizar las imágenes que las sondas *Mariner* y *Viking* tomaron desde su órbitas, los astrónomos se percataron muy pronto de que la mayoría de los cráteres de Marte (a diferencia de los lunares) están erosionados y de que alrededor de casi cada cráter joven y grande se observan unas estructuras parecidas a las coladas de fango. Estas "deyecciones" lodosas son, seguramente, remanentes helados de antiguos cataclismos, colisiones de asteroides o cometas con la superficie de Marte, que derritieron zonas del helado permafrost (el suelo saturado de agua que se ha congelado) y excavaron enormes agujeros en la profundidad del subsuelo hasta llegar a zonas que contenían agua líquida. A finales de los años setenta, los astrónomos concluyeron que durante gran parte de la historia de Marte perduró en el subsuelo una cantidad considerable de hielo y agua.

No todos los cráteres de Marte están rodeados por esas coladas de fango. Los cráteres menores se asemejan a los de la Luna y a su alrededor no hay más que bandas dispersas de deyecciones secas. Cerca del ecuador de Marte sólo exhiben deyecciones fangosas los cráteres de más de unos cuatro kilómetros de diámetro; cerca de los polos, en cambio, las hay en cráteres de sólo un kilómetro. Esta dependencia de la latitud se debe a que el grosor de la capa superficial exenta de hielo varía a lo largo del planeta. Es más profunda cerca del ecuador (llega hasta unos 800 metros) que cerca de los polos, porque el relativo calor de los trópicos purga de agua helada gran parte de la subsuperficie. Por eso cerca del ecuador sólo el impacto de los mayores objetos (es decir, los que generan cráteres grandes) abrirá camino a través de la capa superior y calentará el permafrost helado que está debajo, liberando así un torrente de lodo.

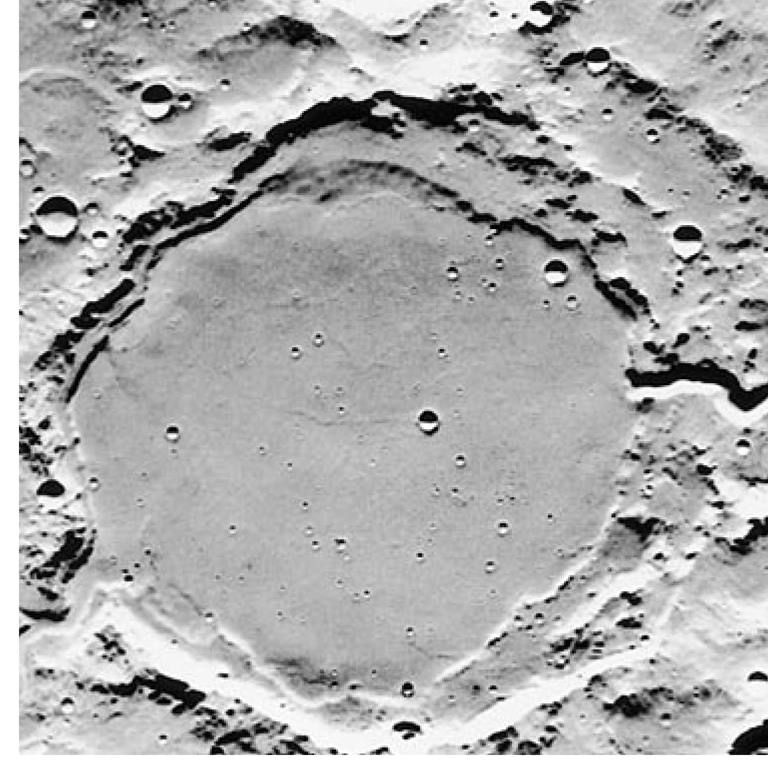
Se han encontrado después otras señales de la existencia, en Marte, de un grueso substrato de suelo helado. También han aparecido pruebas de que en alguna época se formaron en la superficie hielos que crearon paisajes típicamente glaciales; entre ellas están las dorsales rocosas constituidas por los sedimentos que dejaron en sus propios márgenes los glaciares al deshelarse y las cintas serpenteantes de arena y grava depositadas bajo los glaciares por los ríos que corren bajo la capa de hielo (los llamados eskers).

Muchas formaciones del terreno marciano que nos son significativas guardan semejanza con los paisajes gélidos de la Tierra. Por ejemplo, los terrenos plagados de hundimientos de Marte tienen en la Tierra

3. EL CICLO DEL AGUA tendría numerosos componentes en los episodios húmedos de Marte. Una atmósfera densa contendría, muy probablemente, una considerable cantidad de agua evaporada de los lagos y mares. El vapor de agua se condensaría para formar nubes y acabaría por precipitar en lluvia. El agua llovida crearía escorrentías y gran parte se filtraría a través de la superficie. Las nevadas se habrían acumulado formando glaciares, y éstos descargarían su agua de deshielo en lagos glaciales. La circulación hidrotermal, quizás asociada a los lugares con actividad volcánica, habría también transportado hasta la superficie agua procedente de embalses subterráneos profundos.







4. ALGUNOS LAGOS de la Tierra ocupan las depresiones creadas por los impactos de cometas o asteroides. El Nuevo Cráter de Quebec (*arriba*) es uno de los mejores ejemplos de ese fenómeno. Una masa de agua parecida podría haber ocupado este cráter de suelo liso de las zonas altas de Marte (*derecha*); tiene una entrada aterrazada (*a las 8*) y un cauce de salida muy profundo (*a las 3*).

su equivalente, el termokarst, que se forma cuando el hielo almacenado a niveles poco profundos se derrite y el suelo se hunde. Los lóbulos de restos rocosos con forma de abanico, que se observan en las laderas de algunas montañas de Marte, podrían ser glaciares cubiertos de canchales o, lo que es más probable, "glaciares de roca", como los que se forman en la cordillera de Alaska y los Valles Secos del Antártico. Estos terrenos inclinados son el resultado del lento deslizamiento cuesta abajo del primer metro, más o menos, del suelo impregnado de agua a consecuencia de miles de ciclos de congelación y deshielo.

Las deyecciones de lodo alrededor de los cráteres y los fenómenos asociados a los glaciares no son los únicos ejemplos del efecto del agua en la superficie de Marte. En algunas regiones hay valles sinuosos, de un kilómetro de ancho y varios cientos de largo, que forman enormes redes ramificadas. Carl Sagan, de la Universidad de Cornell, Victor R. Baker, de la Universidad de Arizona, y sus colaboradores en los años setenta atri-

5. ESTE GLACIAR DE ROCA, cerca de McCarthy, Alaska *(derecha)*, sale de un circo semicircular característico de las montañas esculpidas por los glaciares. El lugar guarda una semejanza notable con ciertas zonas de Marte (*página precedente*), donde parten líneas de flujo longitudinales de cadenas montañosas curvadas.



buyeron esas depresiones a la acción del agua corriente. Otros valles de Marte empiezan en puntos romos y tienen afluentes más cortos, características típicas de la erosión debida al efecto socavador del agua subterránea. Este proceso, frecuente en la Tierra, es consecuencia de las filtraciones de agua de los manantiales subterráneos, que arrastran las piedras y la tierra que estén encima.

Las imágenes de Marte también revelan la existencia de enormes cauces de desagüe roturados en la superficie. Algunas de estas estructuras miden más de 200 kilómetros de ancho y se extienden a lo largo de 2000 kilómetros o más. Parten de un terreno caótico, nombre que se les da a las regiones donde se amontonan rocas fracturadas que parecen haberse derrumbado por el afloramiento repentino de las aguas subterráneas. Las inundaciones subsiguientes abrieron los gigantescos cauces, crearon islas alargadas de más de 100 kilómetros de longitud y excavaron simas cavernosas de varios cientos de metros de profundidad. Baker comparó los cauces de desagüe con otros fenómenos diluviales similares, aunque de menor alcance, que se observan en ciertas zonas de Oregón y el estado de Washington. (Estas *scablands*, o "tierras costrosas", acanaladas, del noroeste del Pacífico se formaron cuando un glaciar que represaba un gran lago se fracturó de pronto y produjo una inundación catastrófica.)

La geometría de los cauces de desagüe de Marte indica que el agua podría haber corrido por la superficie nada menos que a unos 270 kilómetros por hora. Michael H. Carr, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, ha calculado que la gigantesca cantidad de agua necesaria para crear semejante red de canales habría llenado un océano marciano de 500 metros de profundidad. Pero todo ese líquido no fluyó a la vez. Una fuente de tan colosal cantidad de agua podría haber sido un lago profundo y situado en Vallis Marineris, región del planeta parcialmente cubierta por capas sedimentarias que parecen ser los antiguos depósitos de un lago. El agua podría también haber surgido de un embalse que estuviese bajo el permafrost, calentado por el calor ascendente del interior planetario.

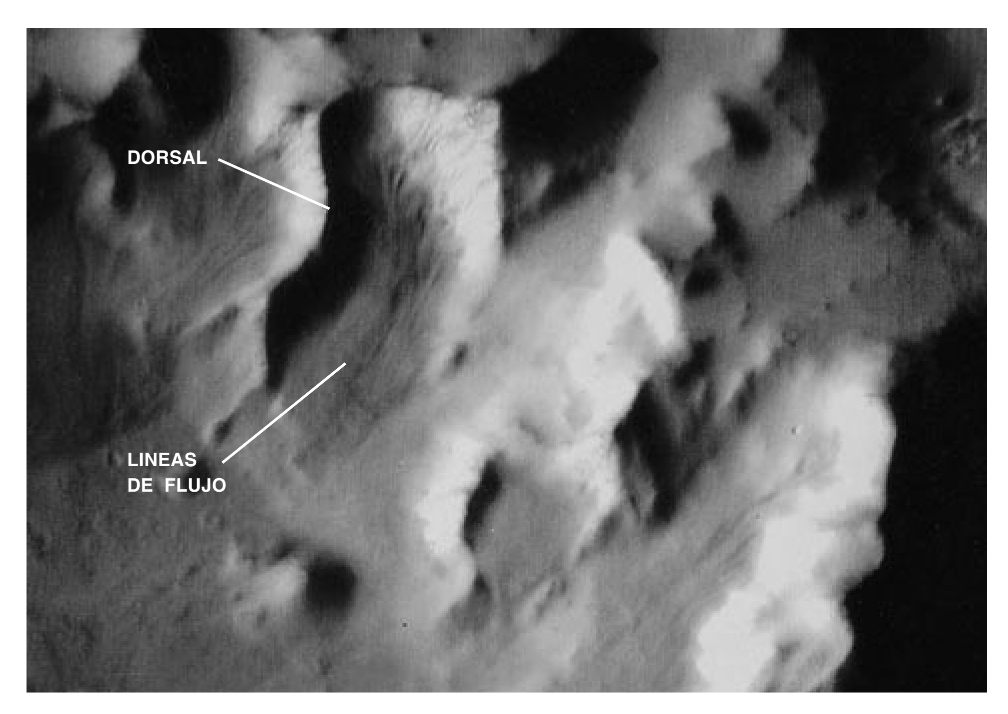
¿Por qué razón habría de inundar de pronto la superficie una acumulación subterránea de agua como ésa? Se desconoce la causa precisa, pero es posible que el agua manase al estrecharse y debilitarse el permafrost que la cubría, debido tal vez a un súbito recalentamiento climático, a la actividad volcánica o a un corrimiento tectónico. Puede que el impacto de un meteorito grande o un temblor sísmico desencadenaran finalmente la inmensa inundación. En cuanto el agua subterránea logró salir a la superficie debió de producirse la erupción del dióxido de carbono que la saturaba —una especie de agua de Seltz marciana— en forma de géiseres descomunales, y así aún se socavaría más la estabilidad de las saturadas capas subterráneas. De ese modo se formaría el terreno caótico y se desatarían inundaciones y coladas de fango de una magnitud que rara vez, si alguna, habrán encontrado parangón en un diluvio terrestre.

Un océano perdido

En algunas zonas altas de Marte hay amplios sistemas de valles que desaguaban en depresiones de fondo sedimentario, zonas bajas que en algún tiempo estuvieron inundadas. El mayor de estos lagos marcianos ocupaba Hellas y Argyre, dos gigantescas cuencas de impacto.

Pero estos lagos no fueron las mayores acumulaciones de agua del planeta. Los grupos de investigación dirigidos por David H. Scott y Kenneth L. Tanaka, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, y por Jeffrey M. Moore, del Centro de Investigación Ames de la NASA, llegaron de forma independiente a una misma conclusión: en recurrentes inundaciones los cauces de desagüe descargaron hacia el norte y se formaron así una serie de lagos y mares transitorios. Según nuestra interpretación, muchos de los rasgos que se observan alrededor de estas viejas cuencas de impacto marcan las zonas donde los glaciares descargaban en esas profundas masas de agua. Tanaka y Moore sostienen que las gruesas capas de sedimento depositadas en esos mares se extienden actualmente a lo largo de gran parte de las extensas llanuras septentrionales. Según varios cálculos uno de los mayores mares al norte de Marte podría haber desplazado un volumen

JEFFREY S. KARGEL y ROBERT G. STROM llevan trabajando juntos diez años largos. Kargel conoció a Strom cuando preparaba el doctorado en ciencias planetarias en la Universidad de Arizona. Durante algún tiempo se centró en las lunas heladas del sistema solar exterior. Strom, que procede de la petroquímica, enseña ahora en la Universidad de Arizona. Ha colaborado con la NASA en las misiones *Apolo*, *Mariner* y *Voyager*.



equivalente al del golfo de México y el mar Mediterráneo juntos.

Cabe incluso la posibilidad de que ese enorme embalse de agua no fuera el ejemplo máximo: pudo haber existido un océano en Marte. Ya en 1973, Henry Faul propuso esta apasionante posibilidad en un artículo que tituló románticamente "El acantilado de Nix Olimpica". Es comprensible que, dada la escasez de observaciones disponibles entonces, nunca se aceptase su publicación, pero durante los últimos diez años otros han hecho revivir su idea utilizando la información proporcionada por las misiones *Viking*.

Timothy J. Parker y sus compañeros del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, propusieron de nuevo en 1989 la existencia de un océano en el norte del planeta; aducían que muchos de los rasgos de las llanuras septentrionales recordaban la erosión de los litorales. Para evitar obstáculos contra su publicación, enmascararon deliberadamente su carácter provocativo con el prosaico título de "Morfología de transición en la región Deuteronilus Mensae occidental de Marte: consecuencias relativas a la modificación del límite entre las tierras altas y bajas". En un artículo posterior se aventuraron a transmitir sus ideas con un título más directo: "Geomorfología costera de las llanuras septentrionales de Marte". Inspirados en parte por ese trabajo, Baker y varios compañeros suyos bautizamos ese hipotético océano como Oceanus Borealis. Nuestros cálculos indicaban que debió de ser cuatro veces mayor que el océano Artico de la Tierra, y propusimos un modelo del ciclo de agua en Marte que podría explicar su creación.

La mayoría de los expertos en planetología acepta hoy en día que se formaron de modo recurrente grandes masas de agua en las llanuras septentrionales de Marte, pero muchos rechazan que haya existido un verdadero océano allí. Algunos sostienen que sólo hubo un vasto cenagal, un océano de lodo. En cualquier caso está claro que alguna vez fluyeron enormes torrentes de agua sobre la superficie marciana. Se desconoce, sin embargo, el destino de semejante caudal. Parte pudo filtrarse hacia la subsuperficie y congelarse en el permafrost. Parte pudo congelarse allí donde fluía y ahora quizá cubra gran parte del suelo de las llanuras del norte, oculta bajo un manto de polvo y arena. Y parte quizá se evaporase, simplemente, y se perdiese en el espacio o se depositase en los polos en forma de nieve.

Hay que fiarse de las viejas sales

Las imágenes de las formaciones terrestres dejadas por antiguos glaciares, valles fluviales, lagos y mares son un testimonio poderoso de que Marte contó con agua en abundancia. Pero además hay otros datos que también lo prueban. Las mediciones espectroscópicas de Marte tomadas desde la Tierra descubren la existencia de minerales de arcilla. De modo más directo, los dos vehículos de aterrizaje del programa *Viking* que se posaron en Marte analizaron muestras del suelo y descubrieron que contiene probablemente de un diez a un veinte por ciento de sales. Cuando las rocas de Marte, como las de la Tierra, quedan expuestas al agua reaccionan y forman sales y minerales arcillosos. Pero seguramente esta meteorización química no es posible en las condiciones frías y secas que imperan actualmente en Marte.

Se han investigado también las rocas marcianas encontradas en la Tierra. Son raras muestras de la superficie de Marte expulsadas hacia el espacio por el impacto de asteroides o cometas y que cayeron sobre la Tierra en forma de meteoritos. Allan H. Treiman, del Instituto Lunar y Planetario de Houston, y James L. Gooding, del Centro Espacial Johnson de la NASA, han mostrado en los últimos años que en algunos de estos "meteoritos SNC" había minerales alterados químicamente, por agua fría y salada unos, otros por soluciones hidrotermales más calientes. De sus conclusiones se deduce que Marte tuvo un clima más cálido y húmedo y quizá manantiales de agua caliente. Por tanto, es posible que las condiciones fueran adecuadas para la vida.

Este dato inspiró a David S. McKay, del Centro Espacial Johnson, y su equipo a examinar un meteorito SNC en busca de indicios de una antigua vida marciana. Aunque su conclusión de que alberga microorganismos fosilizados es discutible (y se debate), la composición de la roca que estudiaron —con grietas rellenas de minerales que probablemente se precipitaron a partir de una sustancia acuosa— apunta a que las condiciones prevalentes en Marte hace unos miles de millones de años debieron de ser compatibles con la existencia de vida.

Casa con esta conclusión el convencimiento de muchos expertos en física del aire de que, a lo largo del tiempo, Marte ha perdido inmensas cantidades de vapor de agua, disipadas hacia el espacio. Los cálculos teóricos concuerdan bien con las mediciones realizadas por sondas espaciales soviéticas que registraron átomos de oxígeno e hidrógeno (derivados de la descomposición del agua atmosférica expuesta a la luz solar) procedentes de Marte. De la pérdida continua de estos elementos se sigue que Marte hubo de tener tanta agua como para colmar un Oceanus Borealis.

Pero el agua no fue la única sustancia que perdió el planeta. Hace

El desfile de las sondas de Marte

Entre los programas científicos para la exploración de Marte, algunos han iniciado ya su andadura. La primera de las sondas —la *Mars Global Surveyor* (abajo, foto superior)— despegó el 7 de noviembre. Entrará en órbita alrededor de Marte en el verano de 1997, y desde allí cartografiará la superficie marciana con todo detalle.

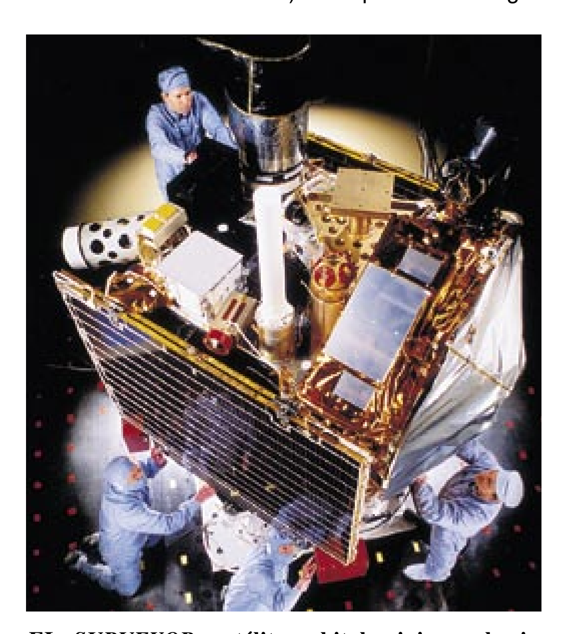
Menos de dos semanas después fracasó el lanzamiento de la misión internacional Marte 96, una flotilla científica para la que Rusia contó con la colaboración de Alemania, Francia, Finlandia y otras naciones; estaba formada por un satélite que se habría situado en órbita alrededor de Marte, dos vehículos de aterrizaje que se habrían posado en la superficie y dos "penetradores" que se habrían adentrado profundamente en el suelo.

Dentro de siete meses una segunda sonda, la *Mars Pathfinder*, tomará tierra en Marte en la boca de un antiguo cauce de desagüe. Será el 4 de julio, 21 años después de que el *Viking 1* se asentara sobre el planeta rojo. De la *Pathfinder*, una vez esté a seguro en la superficie de Marte, saldrá un pequeño vehículo de seis ruedas (*foto inferior*) que explorará el terreno que circunda la zona de aterrizaje.

En los próximos diez años se lanzarán, por lo menos, cuatro satélites orbitales y cinco sondas de superficie más para escudriñar Marte (*véase el calendario a la derecha*). Aunque la estrategia estadounidense sólo preveía una misión, en el 2005, que transportase muestras de Marte a la Tierra, el reciente descubrimiento de indicios de posibles formas antiguas de vida microscópica en Marte ha movido a la NASA a considerar el adelanto de esa misión.

Traer rocas desde Marte es lo más emocionante desde el punto de vista científico, pero supone también un reto formidable para el progreso técnico. La sonda podrá llevar una cantidad suficiente de hidrógeno (un elemento muy ligero) que le sirva de combustible para el viaje de vuelta; sin embargo, quizá tenga que repostar oxígeno, elemento más pesado necesario para quemar el hidrógeno. Para solucionar ese problema puede que la nave haya de generar una carga de oxígeno en la superficie de Marte mediante la descomposición del dióxido de carbono, sustancia que, por suerte, existe en cantidades copiosas en la atmósfera marciana.

—*J.S.K y R.G.S*



EL *SURVEYOR*, satélite orbital, viaja ya hacia Marte.



UN ROBOT móvil explorará la superficie de Marte.



CALENDARIO DE LAS MISIONES A MARTE

Noviembre 1996 (EE.UU.) *Mars Global Surveyor*

La NASA envió esta sonda espacial a Marte para llevar a cabo un estudio orbital de la superficie del planeta. Llegará a su destino en el verano de 1997.

Noviembre 1996 (Internacional) *Marte 96*

Rusia, en colaboración con varios países europeos, pretendía enviar a Marte este grupo de naves (un satélite orbital y cuatro sondas de superficie). El lanzamiento fracasó.

Diciembre 1996 (EE.UU.) *Mars Pathfinder*

Esta sonda aterrizará en un antiguo canal de desagüe el 4 de julio de 1997, donde liberará un robot móvil para explorar el lugar.

1998-1999 (EE.UU.) *Mars Global Surveyor 2* (satélite orbital y vehículo de aterrizaje)

Una de las sondas continuará el estudio orbital centrándose en la localización de depósitos aislados de dióxido de carbono en la superficie. Mientras, un vehículo de aterrizaje se posará en el planeta y explorará la región polar sur.

1998-1999 (Japón) *Planeta B*

Una sonda orbital investigará la alta atmósfera de Marte.

2001 (EE.UU.) *Mars Global Surveyor 3* (nave orbitante y vehículo de aterrizaje)

Un satélite orbital y un vehículo de aterrizaje proseguirán el estudio de la superficie de Marte.

2001 (Rusia) *Marte del 2001*

Una o varias sondas de aterrizaje, posiblemente con vehículos móviles a bordo, explorarán la superficie.

2003 (EE.UU.) *Marte del 2003* (nave orbital y vehículo de aterrizaje)

Mientras uno de los satélites lleva a cabo estudios desde su órbita, una sonda aterrizará y explorará regiones que quizás albergaron vida.

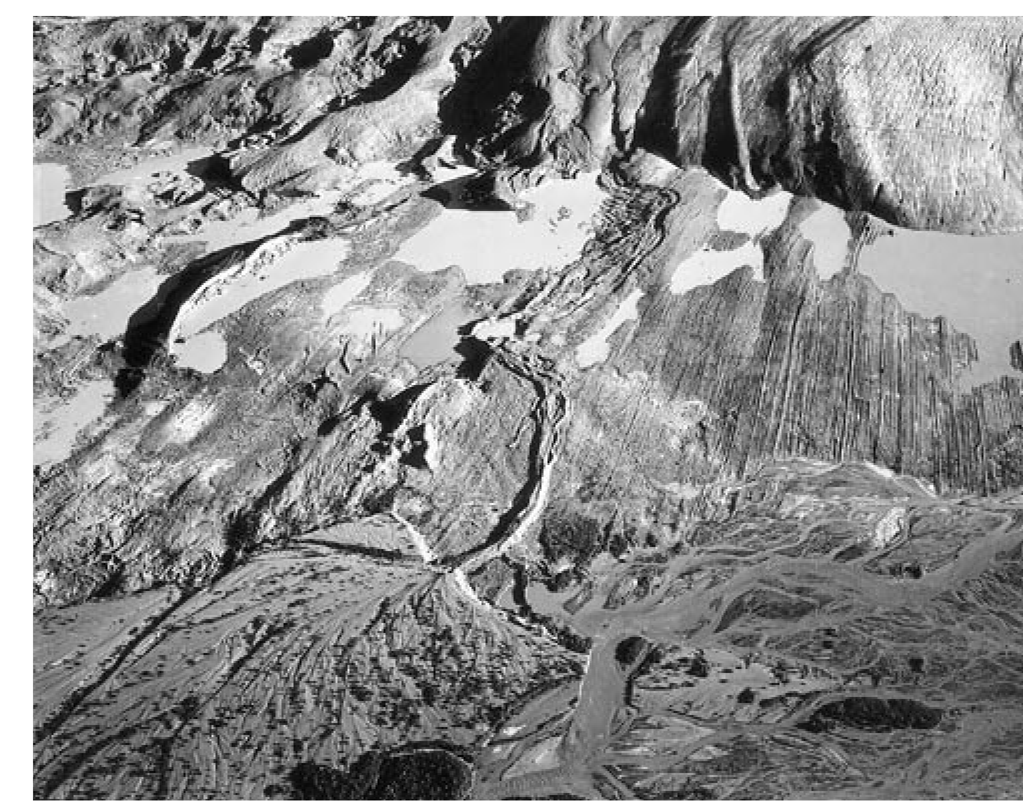
2005 (EE.UU.) *Mars Surveyor del 2005*

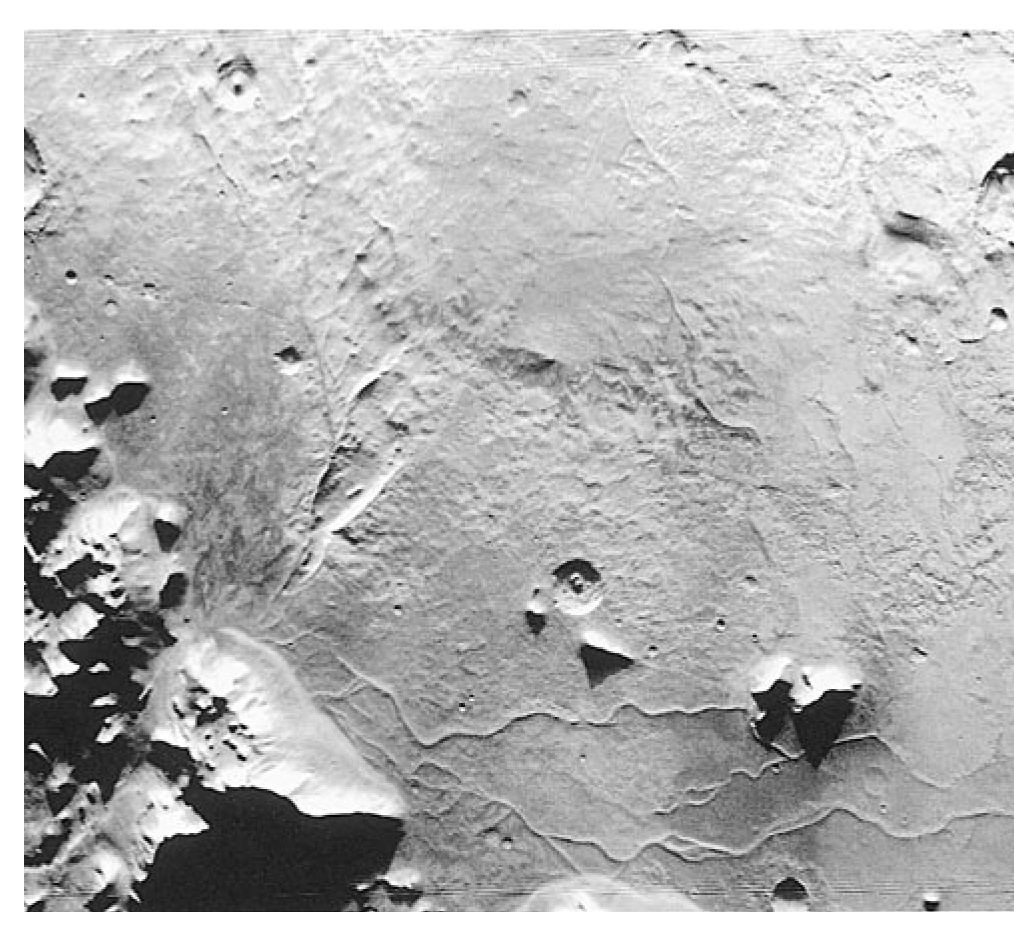
Una nave aterrizará, recogerá muestras y volverá con ellas a la Tierra, quizá gracias a combustible fabricado en la superficie.

poco, David M. Kass y Yuk L. Yung, del Instituto de Tecnología de California, examinaron la evolución del dióxido de carbono —un potente gas de invernadero— en la atmósfera de Marte. Se encontraron con que una enorme cantidad de dióxido de carbono gaseoso se ha disipado a lo largo del tiempo hacia el espacio. Sería tal el volumen, que debió de constituir una atmósfera densa, cuya presión triplicaría la que hay en la superficie terrestre. El efecto de invernadero habría bastado para calentar la mayor parte de la superficie de Marte por encima del punto de congelación del agua. Por tanto, también parece muy verosímil desde esta perspectiva que el clima de Marte fuera mucho más cálido y lluvioso antes que ahora.

Sin embargo, quedan aún numerosos interrogantes acerca de la distribución del agua en la superficie del planeta: ¿Hubo realmente un océano? ¿Se trasvasaba el agua rápidamente de unos depósitos a otros? ¿Cuándo y por cuánto tiempo se registraron precipitaciones en Marte? Aunque la datación absoluta de estos fenómenos sigue siendo una incógnita, la mayoría acepta que el agua esculpió la superficie durante muchos períodos a lo largo de la historia del planeta. La continua pérdida de agua y dióxido de carbono de su atmósfera sugiere que las primeras épocas de Marte (es decir, hace miles de millones de años) quizá fuesen especialmente cálidas y húmedas, pero también ha habido intervalos benignos en épocas bastante recientes: Timothy D. Swindle, de la Universidad de Arizona, y sus colaboradores estudiaron los minerales de un meteorito SNC creados por alteración acuosa y determinaron que su formación se remontaba unos 300 millones de años atrás, una eternidad en la escala temporal humana pero sólo un pequeño porcentaje de los 4600 millones de años del sistema solar. Sus resultados, sin embargo, adolecen de un alto grado de incertidumbre.

Es difícil determinar con exactitud la duración de los períodos de precipitaciones en Marte. Si sus paisajes erosionados se formaron bajo las condiciones típicas de los ambientes glaciales de la Tierra, se necesitaron miles de años, aunque menos de un millón, de clima templado y húmedo. Si esas condiciones hubiesen durado más tiempo, la erosión habría borrado los cráteres de impacto de la faz del planeta y sólo habría quedado algún indicio de que existieron, como sucede en la Tierra.





6. LOS ESKERS son sinuosas barreras compuestas de la arena y la gravilla depositadas por torrentes que fluían bajo una capa de hielo. Decoran el paisaje cerca del frente de un glaciar del valle de Tasnuna, Alaska (*arriba*). Parece haber eskers también en el fondo de la cuenca de Argyre en Marte (*abajo*), de lo que se deduce que en alguna época la zona estuvo cubierta por glaciares en deshielo.





7. ESTAS COLINAS con forma de lágrima, esculpidas por las aguas diluviales del lago glacial Missoula, están en las *scablands*, o “tierras costrosas”, acanaladas del este del estado de Washington (*arriba*). Colinas similares salpican el suelo de los cauces de desagüe de Marte; se forman por lo normal tras el borde elevado de un cráter (*abajo*).

Esta restricción no se puede aplicar a los primeros tiempos de la historia del planeta, hace miles de millones de años, antes de que se hubiesen formado los cráteres que vemos actualmente. En un Marte joven pudo darse una vigorosa erosión que alisara la superficie. Pero más tarde, a medida que avanzaba hacia una mediana edad, su rostro se tornó frío, seco y lleno de cicatrices. Desde entonces sólo habrá habido unos cuantos períodos templados dispersos que rejuvenecieran su superficie en ciertas zonas. No obstante, sigue siendo en muy buena medida un misterio el mecanismo que alterna en Marte los regímenes suaves y los severos. En estos momentos sólo cabe aventurar explicaciones poco elaboradas de cómo podrían haber sucedido estos cambios climáticos.

Dar el calor

Una de las hipótesis se basa en los corrimientos de la oblicuidad, es decir, de la inclinación del eje de rotación desde su posición ideal, perpendicular al plano orbital. Al igual que la Tierra, Marte está ladeado ahora unos 24 grados, inclinación que varía con regularidad en el tiempo. Jacques Laskar y P. Robutel, por un lado, y Jihad Touma y Jack L. Wisdom, por otro, descubrieron en 1993 que, en el caso de Marte, la inclinación cambia también bruscamente. Cada diez millones de años, más o menos, la variación del eje de la inclinación cubre, esporádicamente, hasta 60 grados. Asimismo la orientación del eje de inclinación y la forma de la órbita de Marte cambian con el tiempo, conforme a un ciclo.

Estos mecanismos celestes, sobre todo la tendencia del eje de rotación a inclinarse de forma excesiva, originan temperaturas estacionales extremas. Hasta con una atmósfera enrarecida como la que cubre el planeta en la actualidad, las temperaturas estivales a latitudes medias y altas podrían haber superado sin parar durante semanas el punto de congelación en los períodos de gran oblicuidad, y los inviernos habrían sido incluso más duros de lo que son hoy día.

Con un suficiente calentamiento de uno de los polos durante el verano, sin embargo, la atmósfera debió de cambiar de forma drástica. Es posible que la emisión de gases desde el casquete polar recalentado, procedentes del agua carbónica subterránea o del permafrost rico en dióxido de carbono, adensase la atmósfera en cuantía bastante para generar un clima de invernadero transitorio. En esas condiciones pudo haber agua en la superficie. Las reacciones químicas acuosas habrían, a su vez, formado en esos períodos templados sales y rocas carbonatadas; el proceso iría extrayendo lentamente dióxido de carbono de la atmósfera y reduciendo, por tanto, el efecto de invernadero. La vuelta a unos niveles moderados de oblicuidad enfriaría aún más el planeta y se precipitaría nieve de hielo seco, con lo que seguiría rarificándose la atmósfera y Marte retornaría a su estado gélido normal.

Aunque tal explicación del cambio climático debe someterse a verificación, resulta razonable esperar que la serie de naves espaciales no tripuladas que visitarán Marte durante los próximos diez años ofrecezcan nuevas observaciones y propiciarán la aparición de ideas novedosas. Las expediciones comenzaron el año pasado. Se preveía que este programa de exploración llegase a su fin en el 2005 con la traída a la Tierra de rocas marcianas, pero el descubrimiento de posibles microorganismos fosilizados en un meteorito SNC ha encendido las ganas de obtener antes muestras de Marte para determinar mejor si

allí hubo vida hace varios miles de millones de años, o incluso en una época más reciente.

La sonda *Mars Pathfinder* aterrizará en un llano pedregoso situado en un cauce de desagüe que desembocaba en un antiguo mar. No está preparada para comprobar directamente la existencia de indicios de vida, pero llevará consigo un vehículo rodante que explorará los alrededores. La *Mars Global Surveyor* tomará desde su órbita imágenes con una resolución de unos metros. Sus mediciones se utilizarán para levantar mapas topográficos detallados y buscar depósitos de hielo y nuevas pruebas de que existieron glaciares, lagos y ríos. Con la información que obtengan estas misiones deberíamos formarnos una idea más ajustada del aspecto de Marte durante su último episodio de clima más templado, quizás hace 300 millones de años.

Hace ese mismo tiempo los anfibios emergieron a partir de los peces que abandonaron el mar y poblaron los litorales pantanosos. ¿Podrían haber surgido simultáneamente criaturas complejas en las costas marcianas? Las condiciones básicas que permiten la vida perdurarían un millón de años en la historia tardía de Marte, y quizá mucho más en una época anterior. ¿Favorecerían esos intervalos la evolución de los organismos hacia formas que les permitieran sobrevivir a los drásticos cambios climáticos? ¿Habrá todavía seres vivos en manantiales subterráneos calientes? Los diez años de intensa exploración que nos esperan quizá proporcionen las respuestas definitivas. Si fuesen afirmativas, el salto intelectual sería uno de los mayores de la historia.

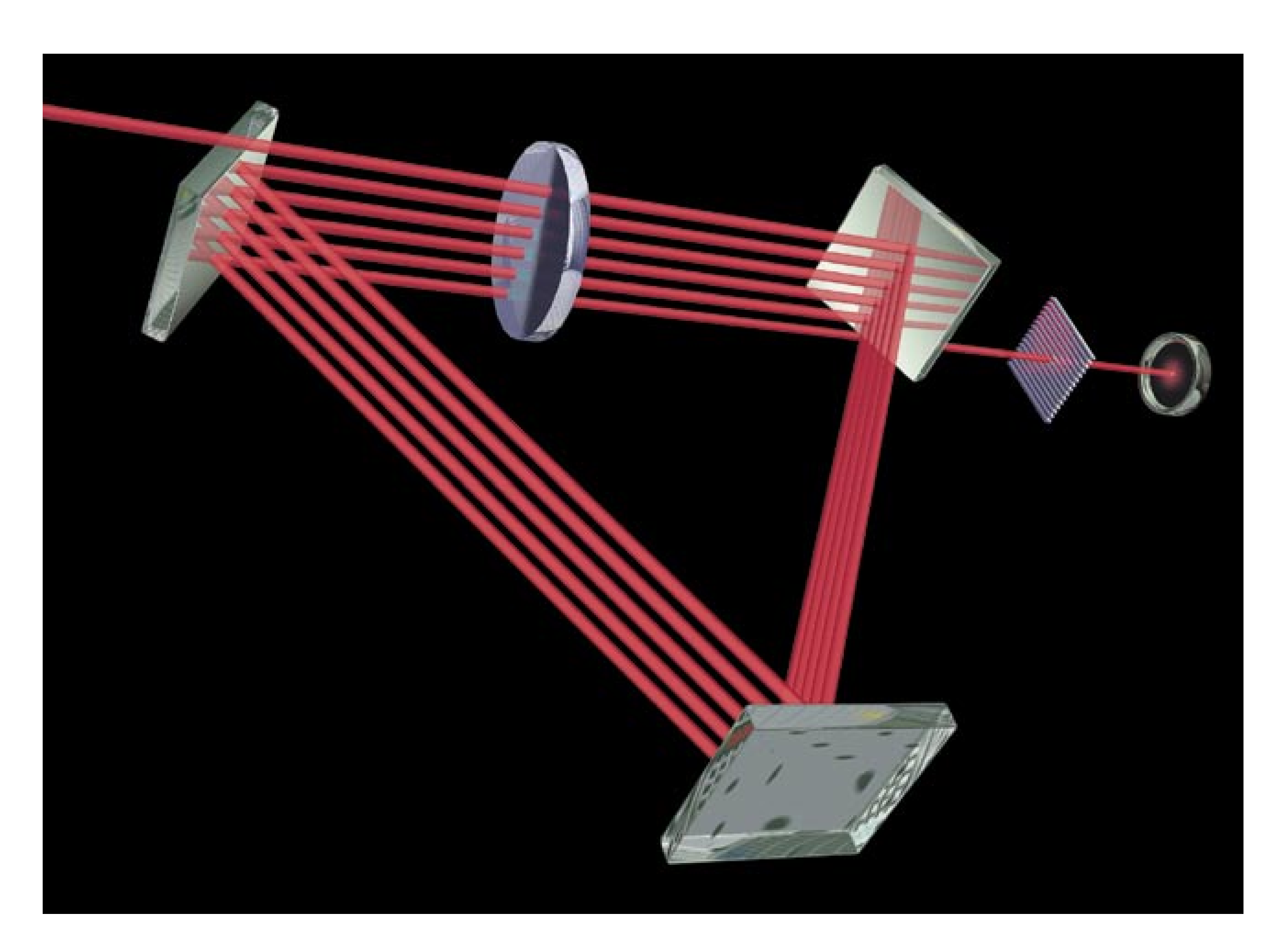
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANCIENT GLACIATION ON MARS. J. S. Kargel y R. G. Strom, en *Geology*, vol. 20, n.º 1, págs. 3-7; enero de 1992.

THE ICE AGES OF MARS. J. S. Kargel y R. G. Strom, en *Astronomy*, vol. 20, n.º 2, págs. 40-45; diciembre de 1992.

COASTAL GEOMORPHOLOGY OF THE MARTIAN NORTHERN PLAINS. T. J. Parker, D. S. Gorsline, R. S. Saunders, D. C. Pieri y D. M. Schneeberger, en *Journal of Geophysical Research E (Planets)*, vol. 98, número 6, págs. 11061-11078; 25 de junio de 1993.

Véase la página externa del Centro de Exploración de Marte en el *World Wide Web*, vía http://cmex-www.arc.nasa.gov.



Visión cuántica en la obscuridad

La óptica cuántica demuestra la existencia de mediciones exentas de interacciones. Así se llama la detección de objetos sin que los toquen la luz

Paul Kwiat, Harald Weinfurter y Anton Zeilinger

Cuenta la mitología griega que el héroe Perseo hubo de luchar contra la temida Medusa. Era el monstruo, con serpientes por cabellos, tan horrible que con entreverlo un instante el desafortunado observador se volvía de piedra. Según cierta versión, Perseo escapó de semejante destino usando hábilmente su escudo como espejo que reflejase la imagen de Medusa, para que ella misma se viese y se convirtiera en piedra. Pero, ¿y si Perseo no hubiera tenido una armadura tan pulida? Habría sucumbido. Si hubiera cerrado los ojos no habría podido dar con su blanco. Y por fugaz que hubiese sido una mirada de reojo, no habría podido evitar que le entrase en la pupila un poco de la luz que se reflejara en Medusa. La habría, pues, visto; habría sido su final.

En el mundo de la física la misma situación se resume en una aseveración, aparentemente inocua, que Dennis Gabor, inventor de la holografía y premio Nobel, hizo en 1962. La idea era que no puede realizarse observación alguna sin que al menos un fotón —la partícula básica, o cuanto, de la luz— dé en el objeto observado.

En los últimos años, sin embargo, quienes se dedican al cada vez más sorprendente campo de la óptica cuántica han aprendido que esa afirmación no sólo dista de ser obvia, sino que, de hecho, es falsa. Ahora sabemos determinar si un objeto está presente sin que lo toque ni un fotón.

1. UN HAZ DE LASER en un camino helicoidal que le conduce a un detector de fotones ilustra el llamado efecto Zenón cuántico, un elemento de las mediciones sin interacciones.

Parece que una medición así, exenta de interacciones, es una contradicción: si no existe interacción, ¿cómo puede haber medición? En mecánica clásica, rama de la física que estudia el movimiento de los balones de fútbol, los planetas y cualquier objeto que no sea demasiado pequeño, esa objeción sería razonable. Pero las cosas son distintas en mecánica cuántica, ciencia de los electrones, los fotones y demás partículas del reino atómico. Según la mecánica cuántica, con un diseño experimental hábil se puede realmente medir sin que haya interacciones. Si, en su bagaje, Perseo hubiese contado con conocimientos de mecánica cuántica, habría podido concebir una forma de "ver" a la Gorgona sin que nada de luz la alcanzase y de rebote le llegara a él. Sin mirar, habría mirado.

Estas prestidigitaciones cuánticas ofrecen muchas ideas para la construcción de aparatos de detección útiles en el mundo real. Pero quizá revistan mayor interés las consecuencias filosóficas. Aplicaciones e implicaciones que se comprenden mejor mediante experimentos mentales, es decir, mediante análisis estilizados que contienen todos los rasgos esenciales de los experimentos reales sin sus complicaciones prácticas.

A modo de experimento mental, piénsese en una variación del juego de las dos cáscaras y la piedrecilla oculta bajo una de ellas. Que la piedrecilla sea especial: que en cuanto le dé algo de luz, se haga polvo. El jugador ha de descubrir dónde está la piedra oculta, pero sin exponerla a la luz o perturbarla de cualquier otra forma. Si se hace polvo, el jugador pierde.

Aunque al principio esta tarea parezca imposible, enseguida nos daremos cuenta de que, mientras el jugador sólo aspire a ganar la mitad de las veces, una fácil estrategia es que levante la cáscara donde no crea que esté el guijarro. Si acierta, sabrá que se halla bajo la otra, aunque no lo haya visto. Con esta estrategia, claro está, no se gana sino por una cábala afortunada.

Modifiquemos a continuación el juego un poco. Parecerá que lo simplificamos. En realidad, haremos imposible que gane un jugador cuyos límites sean los del mundo clásico. Tengamos sólo una cáscara y sea aleatorio que guarde o no la piedra. La meta del jugador es decir si está presente, siempre sin exponerla a la luz.

Supóngase que está bajo la cáscara. Si el jugador no la levanta, no obtendrá información. Si mira, sabrá que la piedra está ahí, pero la habrá, ineludiblemente, expuesto a la luz, así que no hallará sino un puñado de polvo. Podría atenuar la luz para que fuese muy raro que llegase a tocarla. Mas, por definición, si ha visto la piedra es que al menos un fotón ha dado en ella; y habrá perdido.

Elitzur, Vaidman y la bomba

Para que el juego fuese más emocionante Avshalom C. Elitzur y Lev Vaidman, de la Universidad de Tel Aviv, imaginaron que la china era una "superbomba" que estalla en cuanto le llega un solo fotón. El problema entonces es el siguiente: determina si hay una piedra explosiva bajo la cáscara, pero no la detones.

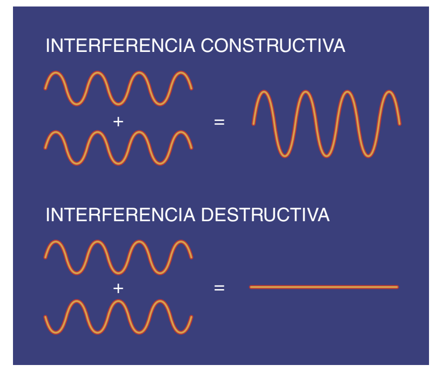
Elitzur y Vaidman aportaron una primera solución. Su respuesta sólo funciona, como mucho, la mitad de las veces. Pero sin ella no se habría llegado a tener esperanzas de ganar el juego.

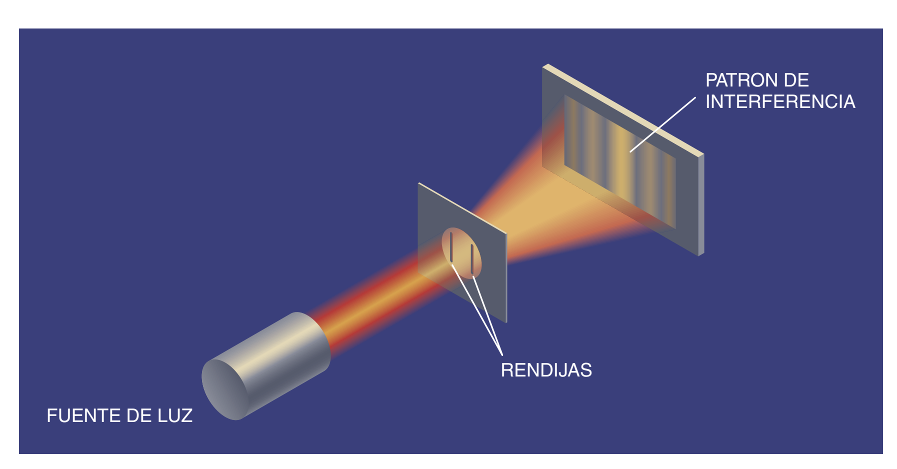
Su método se basa en la naturaleza fundamental de la luz. Ya hemos mencionado que la luz consta de fotones, lo que indica una naturaleza corpuscular. Pero la luz exhibe características claramente ondulatorias, en especial el fenómeno de la interferencia, la manera en que dos ondas se suman. Por ejemplo, en el famoso experimento de las dos rendijas se proyecta luz en una pantalla distante, obligando su paso previo por dos rendijas, dispuesta una sobre la otra. En la pantalla aparecen entonces franjas oscuras e iluminadas. Las franjas brillantes se dibujan allí donde las crestas y los valles de las ondas de luz de una rendija se suman constructivamente con las crestas y valles de las ondas de la otra. La interferencia destructiva

PAUL KWIAT, HARALD WEINFURTER y ANTON ZEILINGER colaboran juntos en la Universidad de Innsbruck. Kwiat, que hoy ocupa una plaza de investigación J. R. Oppenheimer en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, se doctoró por la Universidad de California en Berkeley. Weinfurter recibió su doctorado en la Universidad Técnica de Viena y disfruta ahora de todos los beneficios y ventajas de una beca de la Academia Austríaca de Ciencias. Zeilinger, que se doctoró en la Universidad de Viena, es miembro de la Academia Austríaca de Ciencias.

2. HAY INTERFERENCIA cuando la luz de un láser pasa por dos rendijas. Se generan ondas de luz concéntricas que interfieren entre sí (*arriba*). Las ondas se suman constructiva o destructivamente (*centro*), y se produce el característico patrón de interferencia formado por bandas iluminadas y oscuras (*abajo*).



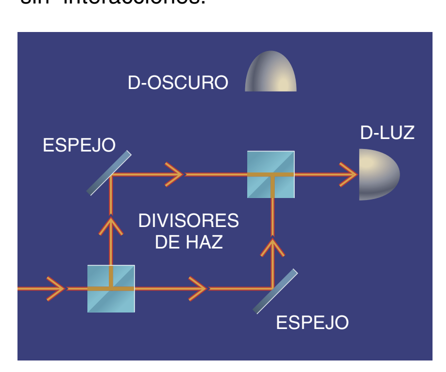


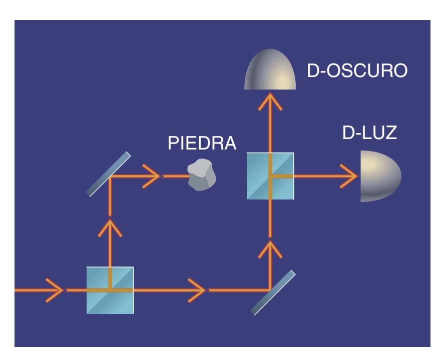




3. EL JUEGO de las cáscaras, en la versión de los físicos, es un experimento mental que ilustra el potencial de las mediciones sin interacciones. Bajo una de las cáscaras hay una piedrecilla especial: con que la dé un poco de luz, se hace polvo. ¿Cómo se puede saber qué cáscara la oculta?

4. EL EXPERIMENTO de Elitzur y Vaidman ofrece al fotón que elija entre dos caminos. Los elementos ópticos se disponen (*arriba*) de forma que los fotones vayan siempre al detector D-luz (que corresponde a la interferencia constructiva), nunca al detector D-oscuro (que corresponde a la interferencia destructiva). Pero la presencia de una piedra en un camino a veces envía un fotón a D-oscuro (*abajo*), lo que indica que ha habido una medición sin interacciones.





genera las bandas oscuras: las crestas que vienen de una rendija anulan los valles que salen de la otra. También puede expresarse diciendo que las franjas brillantes caen en áreas donde la probabilidad de que dé un fotón es muy grande, y las oscuras donde es pequeña.

Según las reglas de la mecánica cuántica, hay interferencia cuando se puede llegar a cierto resultado por dos o más caminos, vías absolutamente indistinguibles (esta definición de la interferencia es más general que la ofrecida por los libros de texto). En el experimento de la doble rendija, la luz llega a la pantalla por dos vías (a través de la rendija de arriba o por la de abajo), y no se hace nada por determinar qué fotón pasa por qué rendija. Si hubiera forma de determinar por qué rendija pasó un fotón, no se daría interferencia, el fotón acabaría en cualquier parte de la pantalla y no saldría ningún patrón de franjas. En pocas palabras, sin dos trayectorias indistinguibles no puede haber interferencia.

Como primer componente de su hipotético aparato medidor, Elitzur y Vaidman tomaron un interferómetro, dispositivo que consta de dos espejos y dos divisores de haz. La luz que entra en el interferómetro cae en un divisor de haz, que la envía por dos caminos ópticos distintos, el de arriba y el de abajo; las trayectorias se recombinan en el segundo divisor de haz, que manda la luz a uno de dos detectores de fotones. El interferómetro, pues, da a cada fotón dos trayectorias posibles entre la fuente de luz y un detector.

Si se ajustan las longitudes de las dos trayectorias del interferómetro de forma que sean exactamente iguales, el montaje se convierte en un experimento de dos rendijas. La diferencia principal estriba en que los detectores de fotones reemplazan a la pantalla que muestra las franjas oscuras y claras. Se coloca uno de ellos de suerte tal, que sólo registre el resultado equivalente a las franjas brillantes del patrón de interferencia (llamémosle el detector D-luz). El otro capta las franjas oscuras; es decir, nunca le llega un fotón (llamémosle detector D-oscuro).

Una piedra en el camino

¿Qué pasa si se pone una piedrecilla en uno de los caminos? Imaginemos que se coloca una en el camino de arriba. Suponiendo que el primer divisor de haz actúa aleatoriamente, con una probabilidad del cincuenta por ciento el fotón tomará el camino de arriba, dará en la piedra (o detonará la superbomba) y no llegará nunca al segundo divisor.

Si toma el camino de abajo no dará en la china. Además, no se producirá ya interferencia en el segundo divisor, pues el fotón sólo tiene una manera de llegar a él. Por tanto, en el segundo divisor el fotón hace también una elección al azar. Puede reflejarse e ir a parar al detector D-luz; esta ejecución no ofrece información, pues podría haber sucedido aun cuando no se hubiera puesto la china. Pero puede también ir al detector D-oscuro. Si pasa esto, sabremos con certeza que había un objeto en un camino del interferómetro, pues de no haberlo habido el detector D-oscuro no se habría disparado. Y como sólo enviamos un fotón, y se manifestó en D-oscuro, no puede haber tocado la piedra. Nos las hemos apañado para medir sin interacción; hemos determinado la presencia del guijarro sin haber interaccionado con él.

El procedimiento sólo funciona a veces, pero hay que resaltar que, cuando funciona, funciona del todo. La magia mecanocuántica de la que depende esta proeza es la naturaleza dual —partícula y onda— de todo. Cuando el interferómetro está vacío, la luz se comporta como una onda. Llega a los detectores por ambos caminos a la vez, lo que produce interferencia. Cuando se pone el guijarro, la luz se comporta como una partícula indivisible y sólo sigue uno de los caminos. La mera presencia de la piedra impide la interferencia, aun cuando el fotón no tenga que interactuar con ella.

Para llevar a la práctica la idea de Elitzur y Vaidman, nosotros y Thomas Herzog, ahora en la Universidad de Ginebra, efectuamos una versión real de su experimento mental hace dos años. Con ella demostramos que era posible construir aparatos que midan sin interacciones. La fuente de fotones sueltos fue un cristal óptico no lineal, especial. Cuando se dirigían a través del cristal fotones ultravioletas emitidos por un láser, a veces se "infraconvertían" en dos fotones hijos de menor energía que se desplazaban por trayectorias desviadas 30 grados una de otra. Al detectar uno de esos fotones no nos quedaba ninguna duda de la existencia de su hermano, que encaminamos entonces hacia nuestro dispositivo experimental.

El fotón entraba en un interferómetro (por sencillez empleamos un tipo ligeramente distinto del propuesto por Elitzur y Vaidman). Los espejos y los

divisores de haz estaban dispuestos de forma que casi todos los fotones saliesen por el mismo camino por donde habían venido (lo mismo que ir al detector D-luz en el ejemplo de Elitzur y Vaidman o que acabar, en el experimento de la doble rendija, en una franja brillante). Cuando no estaba la piedra, la probabilidad de que un fotón fuese al detector D-oscuro era muy pequeña por culpa de la interferencia destructiva (lo mismo que las franjas oscuras en el experimento de la doble rendija).

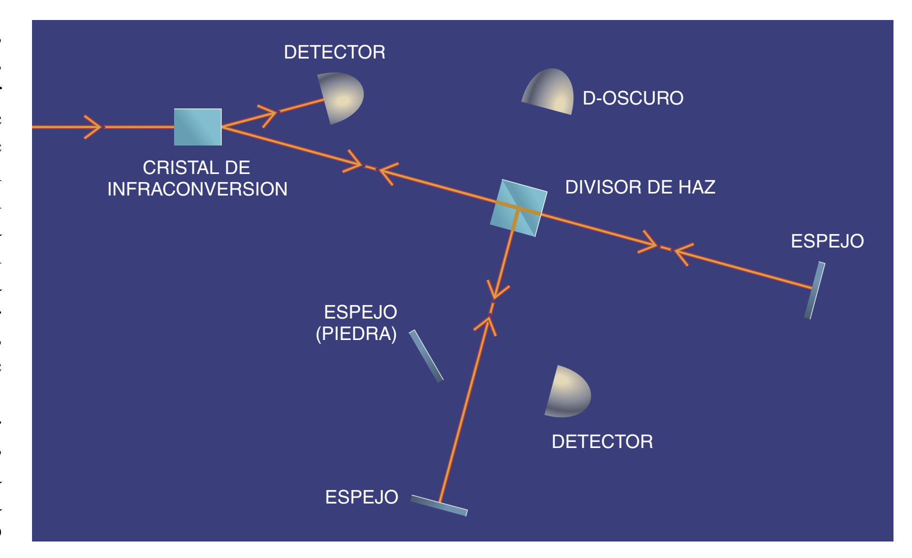
Pero cuando se ponía una piedrecilla en uno de los caminos, las probabilidades cambiaban. La piedra era un pequeño espejo que dirigía la trayectoria de la luz hacia otro detector (D-piedra). Entonces hallamos que alrededor de la mitad de las veces D-piedra registraba el fotón y un cuarto de las veces lo hacía D-oscuro (el resto de las veces el fotón salía del interferómetro por donde había entrado y no dejaba información). El disparo de D-oscuro era la detección sin interacción de la piedra.

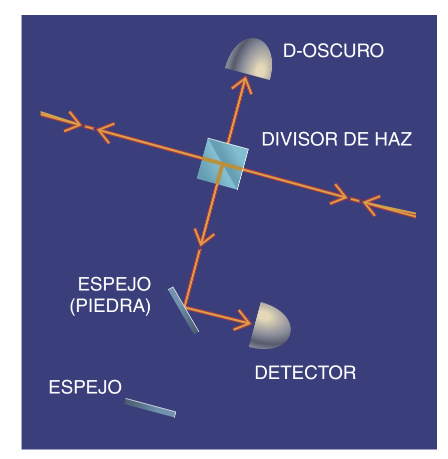
Una modificación simple del montaje fue reducir la reflectividad del divisor del haz; así se restringía la probabilidad de que los fotones se reflejasen hacia el camino donde estaba instalado el espejo que los mandaba a D-piedra. Hallamos que, de acuerdo con la predicción teórica, las probabilidades de que los fotones fuesen a D-piedra y de que fuesen a D-oscuro se iban crecientemente nivelando. Es decir, al usar un divisor de haz apenas reflector, se lograba que hasta la mitad de las mediciones en el procedimiento de Elitzur y Vaidman se realizasen sin interacciones (los casos en que los fotones abandonaban el interferómetro por donde habían venido no se contaban como mediciones).

El efecto Zenón cuántico

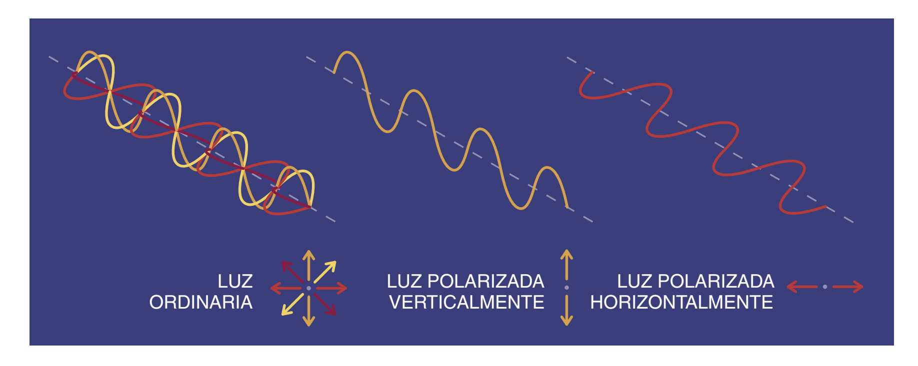
Surgió inmediata la pregunta: ¿no podremos pasar del 50 por ciento? Entre nosotros se levantó una viva discusión. No saltaba a la vista de qué manera podría cambiarse el diseño para obtener probabilidades mejores. Pero en enero de 1994 Mark A. Kasevich, de la Universidad de Stanford, nos visitó en Innsbruck. Pasó un mes entero con nosotros y nos orientó hacia una solución que, si se llegaba a cuajar, haría posible que los objetos se detectaran sin interacciones casi todas las veces. No fue el primer caso, y por suerte tampoco el último, en que el optimismo cuántico triunfó sobre el pesimismo cuántico.

La nueva técnica es una aplicación de otro extraño fenómeno cuántico, estudiado con detalle en 1977 por Baidyanath Misra, ahora en la Universidad de Bruselas, y E. C. Sudarshan, de la Universidad de Texas en Austin. La idea básica es que un sistema cuántico puede quedar atrapado en su estado inicial, aun cuando dejado a su aire evolucionase hacia otro. Esta posibilidad nace del inusual efecto que las mediciones llegan a tener sobre los sistemas cuánticos. Se trata del "efecto Zenón cuántico", fenómeno que recuerda la paradoja planteada por Zenón: el filósofo griego negó la posibilidad de movimiento de la flecha en vuelo porque en cada instante parece "congelada". Se le llama también el efecto de la olla mirada, por un adagio que en inglés dice: "nunca hierve la olla si la miras". Todos sabemos que mirar la olla no debería afectar (y no lo hace) al tiempo que tarde en hervir el agua. En mecánica cuántica, por contra, sí existe un efecto así: la medición afecta al resultado (a este

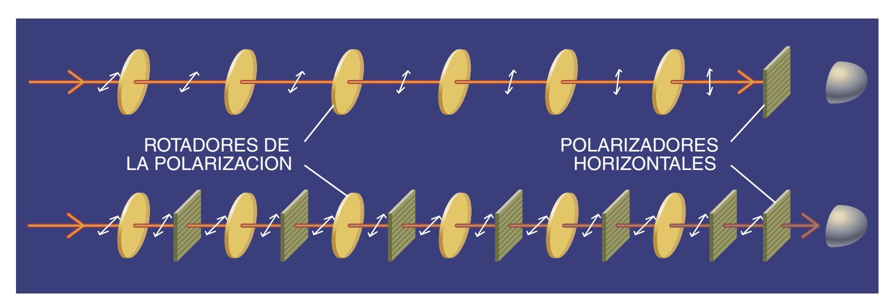




6. LA REALIZACION PRACTICA del montaje de Elitzur y Vaidman usa la luz de un cristal de infraconversión: entra en un divisor de haz, rebota en dos espejos e interfiere consigo misma de vuelta al divisor del haz (*arriba*). No llega luz a D-oscuro (que corresponde a la interferencia destructiva; la constructiva está en la dirección por donde el fotón vino al principio). Si se inserta una "piedra" espejo en uno de los caminos de la luz, no habrá interferencia en el divisor de haz; D-oscuro recibirá fotones a veces (*abajo*).

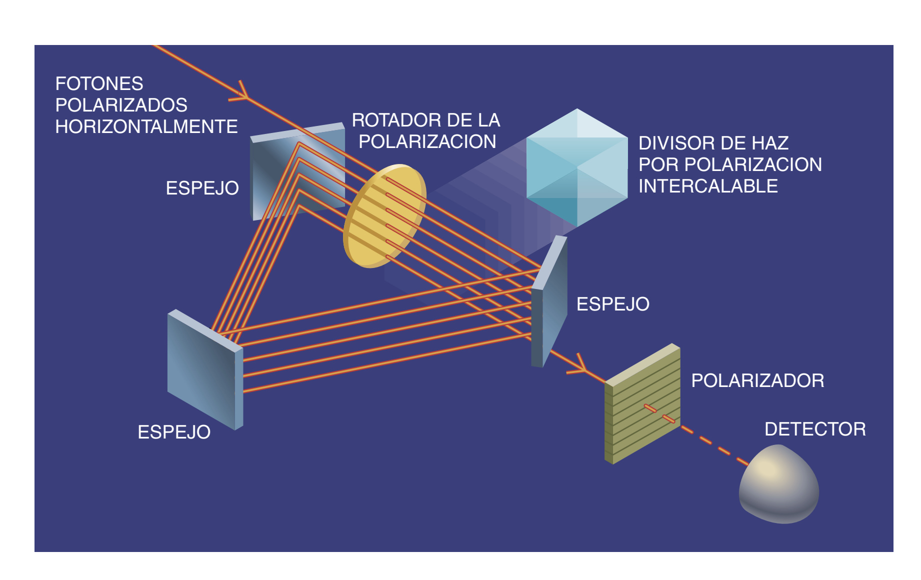


5. LA POLARIZACION tiene que ver con las vibraciones de las ondas de luz a medida que se mueven por el espacio.



7. EL EFECTO ZENON CUANTICO puede manifestarse con aparatos que roten la polarización 15 grados. Tras pasar por seis de esos rotadores, la polarización del fotón se trueca de horizontal en vertical y, por tanto, el polarizador lo absorbe (*fila de arriba*). Pero al intercalar un polarizador tras cada rotador se evita que la polarización gire (*fila de abajo*).

8. LA REALIZACION EXPERIMENTAL del efecto Zenón cuántico se logró haciendo que el fotón siguiese un camino de escalera de caracol de manera que atravesase el rotador de la polarización seis veces. Al intercalar un polarizador a continuación del rotador se suprimió la rotación de la polarización del fotón.



principio se le llama "postulado de proyección").

Kasevich, en esencia, reinventó el ejemplo más sencillo de ese fenómeno, concebido en 1980 por Asher Peres, del Instituto Technion de Israel. Se basa en otra característica de la luz: su polarización. Por tal se entiende la dirección en la que oscilan las ondas de luz —arriba y abajo para la luz polarizada verticalmente, de lado a lado para la polarizada horizontalmente—, siempre en ángulo recto con la dirección de propagación lumínica. La luz procedente del Sol y de las demás fuentes ordinarias vibra en todas las direcciones, pero aquí nos interesan sólo las polarizaciones verticales y horizontales.

Sea un fotón enviado a través de una serie de seis dispositivos, cada uno de los cuales rote la polarización de la luz un poco, de suerte tal que la luz polarizada horizontalmente acabe verticalmente polarizada. Estos rotadores pueden ser unos recipientes de vidrio que contengan agua azucarada, por ejemplo. Al final de su camino por los rotadores el fotón llega a un polarizador, un dispositivo que transmite los fotones con un determinado tipo de polarización y absorbe los que tengan polarización vertical. En este experimento mental, el polarizador transmite hacia un detector sólo los fotones polarizados horizontalmente.

Empezaremos con un fotón con polarización horizontal; cada rotador girará la polarización 15 grados. Está claro, pues, que el fotón nunca llegará al detector, pues tras pasar por todas las células su polarización habrá girado 90 grados (15 por cada uno de los seis rotadores) y se habrá vuelto vertical. El polarizador absorbe el fotón. Esta rotación paso a paso de la polarización es la evolución cuántica que deseamos bloquear.

El truco consiste en intercalar un polarizador horizontal entre cada rotador de la polarización. Por la razón siguiente: tras el primer rotador, la luz no ha girado mucho desde la horizontal. Por tanto, la probabilidad de que el primer polarizador horizontal absorba el fotón es bastante pequeña, sólo el 6,7 por ciento. (Matemáticamente, la da el cuadrado del seno del ángulo de giro.)

Si el primer polarizador no lo ha absorbido, el fotón estará otra vez en un estado de polarización horizontal; ha de ser así, pues es el único estado posible para un fotón que ha pasado por un polarizador horizontal. En el segundo rotador la polarización vuelve a girar 15 grados desde la horizontal, y en el segundo polarizador el fotón tiene la misma pequeña probabilidad de quedar absorbido; si no lo es, volverá a transmitirse en un estado de polarización horizontal. El proceso se repite hasta que el fotón llega al polarizador final.

La probabilidad de que un fotón incidente se transmita a través de los seis polarizadores intercalados y arribe al detector es de dos tercios; viene dada por $(\cos^2(15 \text{ grados}))^6$. Sin embargo, a medida que aumentamos el número de etapas, con la consiguiente disminución del ángulo de polarización-rotación (90 grados dividido por el número de etapas), crece la probabilidad de transmitir el fotón. Con 20 etapas la probabilidad de que el fotón llegue al detector es casi de un 90 %. Si pudiésemos hacer un sistema con 2500 etapas, la probabilidad de que uno de los polarizadores absorbiese el fotón sería justo de una en mil. Y si fuera posible tener un número infinito de etapas, el fotón siempre pasaría adelante. Habríamos, pues, inhibido por completo la evolución de la rotación.

Para conseguir el efecto Zenón cuántico usamos, a fin de preparar el fotón suelto, el mismo cristal no lineal que antes. En vez de utilizar seis rotadores y seis polarizadores empleamos sólo uno de cada; para lograr el mismo

efecto hicimos que el fotón pasara por ellos seis veces mediante tres espejos, una especie de escalera de caracol. Sin el polarizador, se obtiene siempre que la polarización del fotón que sale de la escalera sea vertical. Con el polarizador puesto vimos que salía polarizado horizontalmente, siempre que el polarizador no lo bloquease. Estos casos acontecían dos de cada tres veces en nuestro experimento de seis ciclos, tal y como el análisis de nuestro experimento mental inducía a esperar.

Nos propusimos a continuación acometer una medición sin interacciones, es decir, detectar de una manera muy eficaz un cuerpo opaco sin que en él diese fotón alguno. Ideamos un sistema que era una especie de híbrido entre el ejemplo de Zenón y el método original de Elitzur y Vaidman. Se introducía un fotón polarizado horizontalmente en el sistema y realizaba unos ciclos (otra vez seis) antes de salir. (Para ello hace falta un espejo que se pueda "conmutar" muy deprisa; por suerte, ya se han elaborado espejos así, en realidad dispositivos de interferencia conmutables, para los láseres de impulsos.) En un extremo del sistema hay un rotador de la polarización que gira la del fotón 15 grados en cada ciclo. En el otro extremo hay un interferómetro de polarización; consta de un divisor de haz por polarización y dos caminos interferométricos de la misma longitud en cuyos extremos hay espejos.

El divisor de haz por polarización transmite toda la luz con polarización horizontal y refleja la que la tiene vertical; a todos los efectos importantes, la disyuntiva entre la transmisión y la reflexión es como la encrucijada del experimento de la doble rendija. Si no hay un objeto en el interferómetro de polarización, la luz se divide en el divisor de haz según sea su polarización, se refleja en los espejos de cada camino y el divisor de haz la recombina. El resultado es que el fotón se halla exactamente en el mismo estado que antes de que entrara en el interferómetro (es decir, con una polarización girada 15 grados hacia la vertical). Y tras seis ciclos, la polarización termina siendo vertical.

Las cosas cambian cuando se coloca un objeto opaco en el camino del interferómetro correspondiente a la polarización vertical. Es una situación análoga a intercalar seis polarizadores en el experimento del efecto Zenón cuántico. Así, en el primer ciclo la probabilidad de que el fotón —cuya polarización sólo ha girado 15 grados desde la horizontal— entre en el camino de la polarización vertical (y sea, por lo tanto, absorbido por el objeto) es muy pequeña (6,7 %, como en el experimento mental del efecto Zenón). Si el fotón no es absorbido, es que ha entrado en la trayectoria horizontal, y su polarización vuelve a ser puramente horizontal.

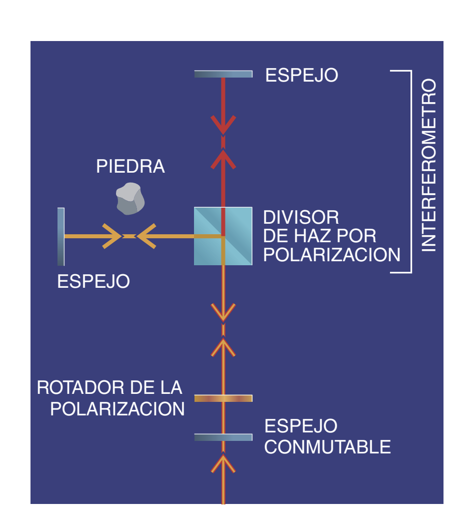
Como en el ejemplo de Zenón, el proceso entero se repite en cada ciclo, hasta que al final, tras seis ciclos, se "desconecta" el espejo conmutable del fondo y el fotón abandona el sistema. Al medir su polarización volvimos a hallar que era horizontal, lo que quería decir que en el interferómetro tenía que haber un bloqueador. Si no, el fotón habría estado polarizado de forma vertical a la salida. Y con más ciclos conseguiríamos que la probabilidad de que el objeto absorbiese el fotón fuese tan pequeña como quisiéramos. Los resultados preliminares del Laboratorio Nacional de Los Alamos han mostrado que hasta un 70 % de las mediciones efectuadas podrían haber ocurrido sin interacciones. Esperamos llegar hasta el 85 % pronto.

La utilidad de la magia cuántica

¿De qué sirven todos estos conjuros cuánticos? Creemos que la situación es parecida a la de los primeros años del láser, cuando se sabía que constituía la solución ideal de muchos problemas desconocidos. El nuevo método de las mediciones sin interacción podría utilizarse, por ejemplo, como un medio nada corriente de fotografía: las imágenes de los objetos se tomarían sin exponerlos a la luz.

Este proceso de "fotografía" funcionaría de la siguiente manera: en vez de enviar un fotón, enviaríamos muchos, uno por píxel, y efectuaríamos con ellos mediciones sin interacción. En las zonas donde el objeto no bloquease el camino interferométrico de la luz, la polarización horizontal de los fotones experimentaría la esperada rotación paso a paso hacia la verticalidad. Donde sí lo bloquease, unos cuantos fotones serían absorbidos y las polarizaciones de los demás quedarían atrapadas en el estado horizontal. Finalmente, tomaríamos una imagen de los fotones a través de un filtro polarizador, una vez hubiesen hecho el número requerido de ciclos.

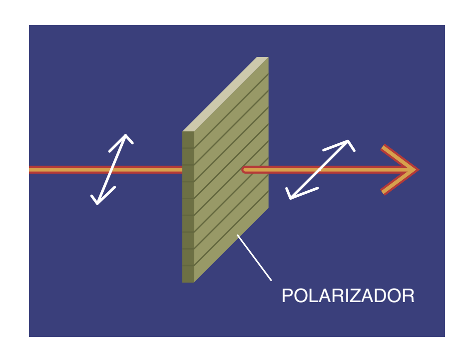
Si el filtro estuviera horizontalmente alineado, obtendríamos una imagen del objeto; si verticalmente,

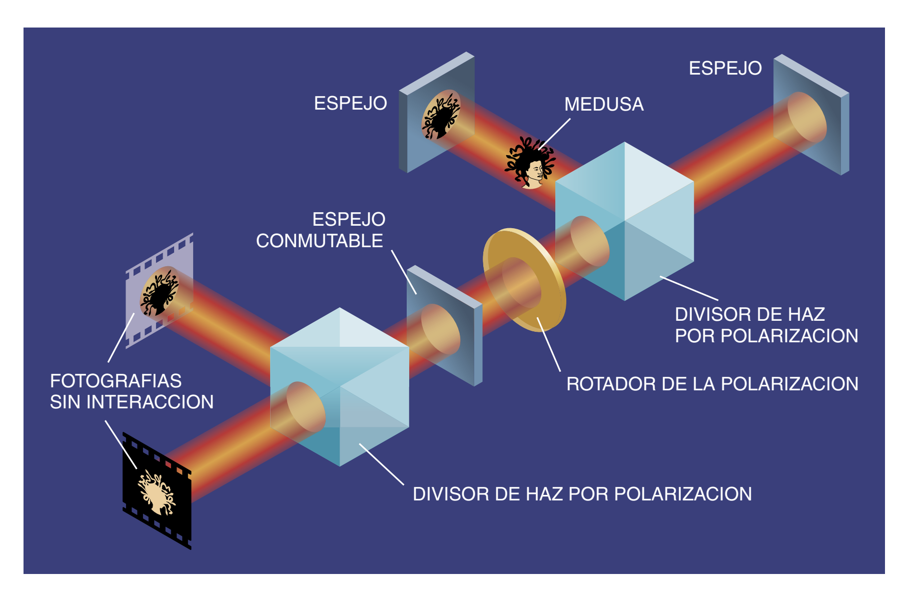


9. LAS MEDICIONES EFICIENTES sin interacciones combinan los montajes del efecto Zenón cuántico y del procedimiento de Elitzur y Vaidman. El fotón entra bajo el espejo conmutable y sigue los caminos ópticos seis veces antes de que se le deje salir atravesando el espejo. Su polarización final seguirá siendo horizontal si hay una piedra en uno de los caminos de la luz; si no, habrá rotado hasta ser vertical.

El postulado de proyección

El postulado de proyección dice que en cualquier medición efectuada sobre un sistema cuántico sólo son posibles ciertos resultados. Además, tras la medición, el sistema cuántico queda en un estado determinado por los resultados obtenidos. Así, la polarización de un fotón que haya pasado por un polarizador horizontal será necesariamente horizontal, aun cuando su polarización original fuese casi vertical (el polarizador elimina la componente vertical de la polarización). En ese caso la probabilidad de transmisión será, sin embargo, pequeña.





10. TAMBIEN LA FOTOGRAFIA puede realizarse con técnicas que eludan las interacciones. De esa manera, el objeto —una "Medusa" a la que no se deba mirar directamente— absorberá muy pocos fotones.

nos saldría el negativo. En cualquier caso, formarían la imagen fotones que nunca habrían tocado el objeto. Esas técnicas también funcionarían con un objeto semitransparente y podrían generalizarse para hallar el color de un objeto (pero estas metas serían más difíciles).

Es concebible que una variación de este método de creación de imágenes sea un día valioso para la medicina (como medio, por ejemplo, de tomar imágenes de las células vivas). Supongamos que pudiéramos radiografiar a alguien sin someterlo a muchos rayos X penetrantes. Esa técnica tendría para los pacientes menos riesgos que los rayos X corrientes. (Desde un punto de vista práctico es improbable que se realice esta forma de fotografía de rayos X; hay que tener en cuenta la dificultad de obtener elementos ópticos para esa longitud de onda de la luz.)

Una utilización más inmediata podría ser la toma de imágenes de las nubes de átomos ultrafríos generadas recientemente en varios laboratorios. Las más frías exhiben la condensación de Bose-Einstein, un tipo nuevo de estado cuántico en el que muchos átomos actúan como una sola entidad. En una nube así, cada átomo está tan frío —es decir, se mueve tan despacio— que basta un fotón para arrancar uno de ellos de la nube. En un principio no había ninguna manera de tomar una imagen del condensado sin destruir la nube. Los métodos de medición sin interacción podrían ser una forma de crear imágenes de estos grupos de átomos.

Además de formar imágenes de los objetos cuánticos, los procedimientos que eluden las interacciones podrían también producir ciertos tipos de tales objetos. En concreto, podrían llevar más allá la creación de un "gato de Schrödinger", un ente teórico muy querido de la mecánica cuántica. El felino cuántico se prepara de forma que exista en dos estados a la vez: está vivo y muerto a la vez. (Es una superposición de dos estados.) A comienzos de 1996, investigadores del Instituto Nacional de Patrones y Tecnología de los Estados Unidos lograron crear un tipo provisional de gato de Schrödinger —un "gatito"— con un ion de berilio. Emplearon una combinación de láseres y de campos electromagnéticos para que el ion existiese a la vez en dos lugares espaciados 83 nanómetros, una gran distancia a escala cuántica.

Si a ese ion se le interrogase con los métodos que evitan las interacciones, el fotón interrogador también quedaría en una superposición. Acabaría polarizado vertical y horizontalmente a la vez. El tipo de montaje experimental comentado más arriba podría colocar a un grupo de, por ejemplo, 20 fotones en la misma superposición. Cada fotón "sabría" que su polarización es la misma que la de los demás, pero ninguno cuál es la suya propia. Seguirían en esa superposición hasta que una medición les revelase que estaban polarizados todos horizontalmente o todos verticalmente. El considerable grupo de fotones presos en esta peculiar condición mostraría que los efectos cuánticos pueden manifestarse a escala macroscópica.

Ajena al dominio de la experiencia cotidiana, la idea de las mediciones sin interacción parece extraña, si no abiertamente absurda. Lo parecería quizá menos si se tuviese presente que la mecánica cuántica actúa en el reino de las potencialidades. Porque *podría* haber habido una interacción podemos evitar que haya una.

Si esto no sirve de ayuda, consuélese con que hasta a los físicos les haya costado mucho el ir aceptando, con el tiempo, la rareza del mundo cuántico. Las nociones fundamentales en que se basan los prodigios de la magia cuántica —el aspecto complementario, de onda y partícula, de la luz, la naturaleza de las mediciones cuánticas— se conocen desde 1930. Sólo hace poco se ha empezado a aplicarlas al descubrimiento de nuevos fenómenos del procesamiento cuántico de la información, como la capacidad de ver a oscuras.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER. Richard P. Feynman. Princeton University Press, 1985.

QUANTUM MECHANICAL INTERACTION-FREE MEASUREMENTS. Avshalom C. Elitzur y Lev Vaidman, en *Foundations of Physics*, vol. 23, n.º 7, págs. 987-997; julio, 1993.

INTERACTION-FREE MEASUREMENT. P. G. Kwiat. H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger y M. A. Kasevich, en *Physical Review Letters*, vol. 74, n.º 24, págs. 4763-4766; 12 de junio, 1995.

En la World Wide Web se pueden hallar discusiones sobre las mediciones sin interacción en http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/ #Inter y en http://p23.lanl.gov/Quantum/kwiat/ifm-folder/ifmtext.htm.

La cuestión de los coches eléctricos

Con la introducción de nuevas técnicas, los vehículos eléctricos podrían ya ocupar las calles de nuestras ciudades. Sólo razones de interés político explican la persistencia del motor de explosión

Daniel Sperling

En los países industrializados, los automóviles son responsables de la mitad de la contaminación urbana y una cuarta parte de los gases que producen el efecto de invernadero. Ante el crecimiento de vehículos previsto para la próxima década, las naciones desarrolladas tendrán que tomar medidas para evitar inaceptables penalizaciones de orden sanitario, político y económico. El precio del petróleo probablemente subirá. Además, no puede aceptarse que el desmedido desarrollo imponga un cambio climático al resto del mundo.

Cuatro alternativas se ofrecen a los gobernantes y a la industria: limitar el uso de vehículos; mejorar el rendimiento y disminuir la emisión de gases de los motores de gasolina tradicionales; utilizar combustibles menos nocivos, o buscar sistemas de propulsión que contaminen menos. De todas ellas, la única viable es la de adoptar otro agente propulsor, concretamente la electricidad. Las demás soluciones, atractivas en teoría, resultan poco prácticas u ofrecen sólo mejoras marginales. Así, por ejemplo, utilizar menos los coches podría resolver los conflictos circulatorios y toda una serie de problemas sociales y ambientales, pero la experiencia mundial revela la dificultad de conseguir que la gente se acostumbre a prescindir del transporte privado. En Estados Unidos, el transporte colectivo y el uso compartido de vehículos ha descendido desde la Segunda Guerra Mundial; en Europa occidental, pese a los elevados precios de la gasolina y la gran densidad de población en movimiento, todavía se realiza en automóvil el 80 % de todo el tráfico de personas.

Asimismo impresiona el mayor rendimiento energético de la gasolina, si bien en el aspecto económico apenas se ha notado mejora en los diez últimos años. No costaría demasiado utilizar en los motores de explosión otros combustibles como el metanol o el gas natural, pero sólo se conseguirían reducciones marginales de la contaminación y la emisión de gases de invernadero, teniendo en cuenta que las compañías petroleras ya gastan enormes sumas en el desarrollo de variedades menos contaminantes de la gasolina.

Los vehículos cuyas ruedas son accionadas por motores eléctricos y no por la transmisión mecánica de un motor de gasolina podrán reducir notablemente la contaminación urbana y el efecto de invernadero en los próximos diez años. Y sentar las bases para un futuro sistema de transporte que apenas contamine. Es cierto que los automóviles de propulsión eléctrica son tan antiguos como los de motor de combustión. Pero es ahora cuando una serie de desarrollos técnicos —nacidos al amparo de la revolución informática y de la reaganiana iniciativa de defensa estratégica (la llamada "guerra de las galaxias") en los años ochenta— prometen conseguir que este medio de propulsión sea suficientemente eficaz y económico como para competir con la gasolina. Superar las bien consolidadas ventajas de los coches de gasolina exigirá, no obstante, un esfuerzo concertado de la industria y los gobiernos para asegurar que el consumidor perciba los beneficios ambientales que ofrecen los coches eléctricos y se sienta estimulado para su compra.

DANIEL SPERLING dirige el instituto de estudios del transporte en la Universidad de California en Davis, donde enseña ingeniería civil. Ha escrito dos libros y más de cien artículos sobre vehículos eléctricos y aspectos ambientales del transporte. Preside una comisión federal sobre combustibles alternativos y es miembro de la sección de transporte de la norteamericana Academia Nacional de Ciencias.

La mejora de rendimientos

En los vehículos de propulsión eléctrica se incluyen no sólo los que se alimentan de baterías cargadas por la red eléctrica, sino también los que generan su propia electricidad o la almacenan en dispositivos distintos de las baterías. Su denominador común es un eficaz motor eléctrico que acciona las ruedas y extrae energía del movimiento del coche cuando la velocidad de éste disminuye. Por contra, los vehículos de motor de explosión utilizan un motor que funciona constantemente, cuya potencia se aprovecha a través de embragues y engranajes para mover las ruedas y excitar un generador que suministra energía eléctrica a los diversos accesorios del coche.

Por varias razones los vehículos eléctricos tienen mejor rendimiento —y por tanto contaminan menos— que los de combustibles. Primero, porque el motor eléctrico gobierna directamente las ruedas y no consume energía cuando el coche está parado o se desplaza por inercia, con lo que su rendimiento eficaz aumenta en un quinto aproximadamente. Los sistemas de frenado regenerativo, que tornan en generador el motor cuando el coche aminora la marcha, pueden entregar hasta la mitad de la energía cinética del vehículo a células acumuladoras, lo cual es muy ventajoso en las arrancadas y paradas del tráfico urbano.

Además, el motor eléctrico convierte en fuerza motriz más del 90 % de la energía de sus células acumuladoras, mientras que las transmisiones de los motores de explosión aprovechan menos del 25 % de la energía aportada por la gasolina. Aunque dichas células suelen cargarse por generadores eléctricos cuyo rendimiento medio sólo llega al 33 %, la propulsión eléctrica todavía aventaja en un 5 % neto a la mecánica convencional. Ciertas innovaciones como la generación con reciclaje (que extrae energía suplementaria del calor de los gases de escape de una planta de energía corriente) pronto permitirán elevar hasta en un 50 % el rendimiento de las centrales eléctricas que recargan las células acumuladoras. Este fuerte incremento aumentará proporcionalmente la parte de energía que, en última instancia, se entrega a las ruedas del vehículo eléctrico. Aún más eficaces son las células de combustible, que "queman" hidrógeno para generar electricidad directamente a bordo del automóvil.

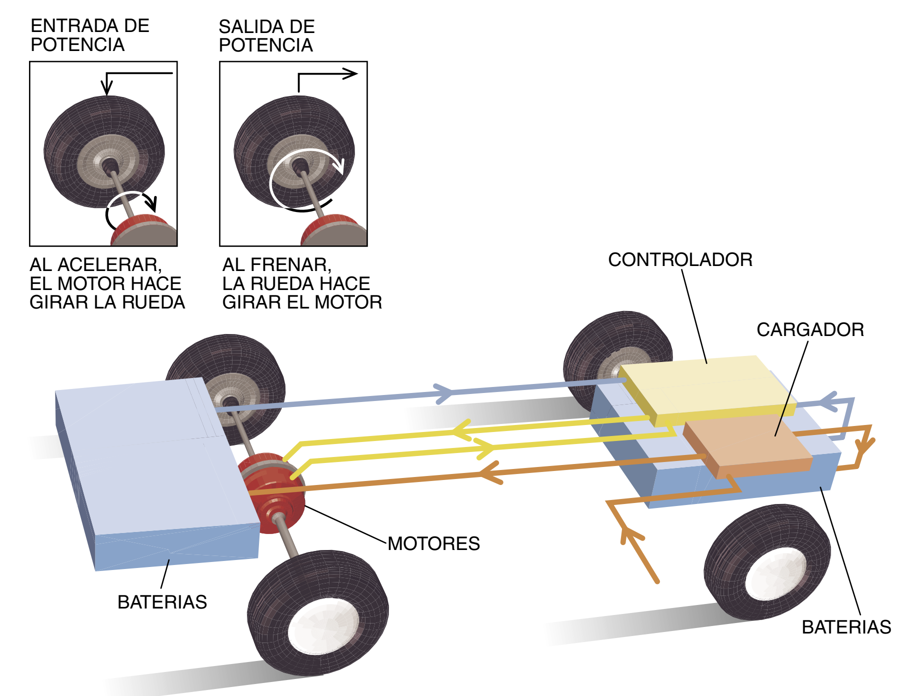
La propulsión eléctrica aporta otras ventajas en cuanto a calidad del aire, puesto que desplaza los focos desde los que se dispersan los contaminantes. Los coches tradicionales despiden por el tubo de escape monóxido de carbono y otros agentes nocivos a lo largo de todo su recorrido. En cambio, la contaminación derivada de la generación de energía eléctrica suele concentrarse en unas pocas plantas alejadas de los núcleos urbanos.

Un coche eléctrico alimentado por baterías apenas si desprende monóxido de carbono ni hidrocarburos volátiles sin quemar, y sus emisiones de óxidos de nitrógeno se ven drásticamente reducidas. En regiones atendidas por centrales térmicas de carbón, podrían provocar un aumento marginal de las emisiones de óxidos de azufre y de partículas sólidas. No obstante, la contaminación creada por la fabricación moderna de baterías y motores eléctricos es despreciable.

Los vehículos híbridos —en los que se combinan pequeños motores de combustión con motores y dispositivos de almacenamiento eléctricos— recortan las emisiones casi tanto como los puramente eléctricos alimentados por baterías. Estos vehículos híbridos pueden llegar a ser preferibles en regiones donde la

1. EL AUTOMOVIL ELECTRICO de Renault está compuesto de piezas livianas para reducir la carga que soporta el motor. Por sus características, los coches eléctricos son especialmente adecuados para las cortas distancias urbanas.





2. LOS COMPONENTES ESENCIALES de un vehículo eléctrico son los acumuladores de energía, el controlador de potencia y el motor. La transmisión de energía en forma eléctrica permite prescindir del tren de transmisión mecánico. El frenado regenerativo (*recuadros*) utiliza el motor como generador, devolviendo energía a los acumuladores cada vez que se hace uso de los frenos.

energía eléctrica se genera en plantas de carbón. Por supuesto, el impacto de los coches eléctricos sobre la limpieza del aire será máximo cuando la energía eléctrica se obtenga de fuentes no contaminantes: solares, eólicas, hidroeléctricas o nucleares. Entre los primeros beneficiarios figurarían lugares en donde, como California, casi toda la electricidad proceda de plantas de gas natural muy controladas y de centrales hidroeléctricas y nucleares que no emiten contaminantes. Pero también otros que, como Francia, tengan en las centrales nucleares su principal fuente de energía eléctrica.

Estos beneficios ambientales podrían revestir gran importancia. Numerosas zonas metropolitanas de Estados Unidos padecen una contaminación atmosférica superior a la que autorizan las normas sanitarias sobre pureza ambiental, y en su gran mayoría seguirán infringiendo la ley en el año 2000. La contaminación en Los Angeles es tan intensa que, aun haciendo desaparecer todos los vehículos de sus calles, no podrían en modo alguno cumplirse las normas. Muchas otras regiones tienen pocas esperanzas de satisfacer sus respectivas ordenanzas ambientales, aunque las gasolinas sean de combustión más limpia y los motores de explosión se perfeccionen. Y en otros lugares del mundo —Bangkok, Kathmandú, Ciudad de México, etc.— el aire está todavía más contaminado que en Los Angeles.

El almacenamiento es la clave

Los vehículos eléctricos que hoy circulan se basan en baterías de acumuladores de plomo que se cargan de la red a través de un enchufe normal. Probablemente jamás se impondrán en el mercado, ya no sólo porque son voluminosas y caras sino porque la autonomía del coche entre las sucesivas cargas apenas rebasa los 150 kilómetros. Sin embargo, este problema a menudo se exagera. En primer lugar, los vehículos de corto alcance tienen una gran utilidad, y por otra parte aparecen ya nuevos dispositivos para almacenamiento de energía que están pasando de los laboratorios a las cadenas de producción.

En una encuesta regional dirigida conjuntamente con mis colegas de la Universidad de California en Davis, comprobamos que casi la mitad de todas las familias poseedoras de más de un automóvil —que son mayoría en Estados Unidos y representan más del 70 % de las compras de nuevos vehículos— podían fácilmente adaptarse a utilizar un segundo coche con alcance menor de 180 kilómetros. Muchos de los encuestados se prestaban a aceptar alcances todavía muy inferiores. La limitada autonomía en distancia se ve compensada por las ventajas ambientales y la posibilidad de recarga en el propio domicilio, sin tener que acudir a la estación de servicio.

Probablemente las baterías se utilizarán cada vez menos en los coches eléctricos. Entre las alternativas en desarrollo se encuentran los ultracondensadores, capaces de almacenar enormes cantidades de electricidad con carga y descarga rápidas, los volantes de inercia que almacenan energía en un rotor giratorio y las pilas electroquímicas, que convierten sustancias combustibles en electricidad despidiendo vapor de agua.

En sus comienzos, el desarrollo de los ultracondensadores se apoyó en el macroprograma norteamericano de defensa estratégica. Las técnicas de fabricación avanzadas pueden eliminar las minúsculas imperfecciones del aislamiento de un condensador tradicional que dejan escapar la carga. Los nuevos materiales permiten intercalar el carbono y el electrolito líquido de un condensador en capas mucho más finas que antes. De ahí que en un litro de volumen se puedan almacenar unos 15 watt-hora (energía que haría funcionar durante un minuto un motor de un caballo), y que la descarga pueda efectuarse a razón de tres kilowatt. Estos dispositivos ultracondensadores existen ya en pequeñas unidades para calculadoras, relojes y rasuradoras eléctricas.

Los volantes de inercia se utilizaron por primera vez para el transporte en los años cincuenta. Autobuses movidos por este tipo de propulsión recorrieron las calles de la ciudad suiza de Yverdon, acelerando los rotores en cada parada. Desde entonces los diseños han variado sustancialmente; hoy día los rotores de metal compuesto pueden alcanzar las 100.000 revoluciones por segundo, velocidad solamente limitada por la resistencia a la tracción de su anillo. Los rodamientos magnéticos reducen el rozamiento hasta el punto de que un rotor pueda conservar el 90 % de su energía durante cuatro días. Se espera que en torno al año 2000 aparezcan los primeros volantes de inercia y ultracondensadores de alta potencia en vehículos comerciales. Dada su capacidad de suministrar energía con gran rapidez, irán acompañando a las baterías: éstas atenderán las necesidades normales de la conducción, mientras que los condensadores o volantes de inercia prestarán la po-

tencia suplementaria requerida, por ejemplo, para acelerar o subir una pendiente. Tal combinación permitirá utilizar baterías de menor tamaño y prolongar su vida útil.

Pero ni siquiera las predicciones más optimistas en cuanto a técnicas de almacenamiento de energía llegan a compararse con los 2200 kilojoule que almacena un depósito de 40 litros de gasolina. Por ello muchos expertos pronostican que los vehículos de tracción eléctrica más populares serán híbridos, es decir, irán propulsados por energía eléctrica, pero en último término utilizarán pequeños motores de combustión para la carga de baterías, condensadores u otras fuentes de energía. La potencia media que exige la conducción en autopista es sólo de unos 10 kilowatt para un coche de turismo normal, por lo que el motor puede ser pequeño; los elementos acumuladores se cargan durante los períodos de salida mínima y se descargan rápidamente cuando el coche se acelera. Los motores de explosión pueden alcanzar rendimientos hasta del 40 % cuando funcionan a velocidad constante, y por tanto el rendimiento global de un vehículo híbrido puede incluso superar el de una tracción puramente eléctrica.

Quizá la opción más seductora sea la de utilizar pilas de combustible. Muchos las consideran las sucesoras más probables de los motores de explosión, y son la pieza básica de una asociación establecida entre el gobierno federal y tres grandes fabricantes norteamericanos para el desarrollo de vehículos de la nueva generación. En estas células se quema hidrógeno para producir vapor de agua y dióxido de carbono, sin emitir esencialmente ningún otro subproducto al generar electricidad. (Hay versiones modificadas que pueden utilizar otros combustibles, como el gas natural, el metano o la gasolina, a costa de aumentar las emisiones y reducir el rendimiento.) Aunque tales elementos son más conocidos como fuentes de alimentación para naves espaciales, ya en 1959 se utilizó una primera versión en un tractor de granja experimental.

Los prototipos de buses para pilas de combustible construidos a mediados de los noventa han demostrado que esta técnica es viable, pero su aspecto más crítico sigue siendo el coste. Las pilas con membranas para el intercambio de protones (PEM), actualmente las más atractivas para uso en vehículos, costaban más de 13 millones de pesetas por kilowatt hace unos pocos años, pero se espera rebajar el precio a menos de un millón al iniciarse el próximo siglo, y quizá bajen hasta las 10.000 pesetas por kilowatt —cifra competitiva con el coste de los motores de explosión— cuando se fabriquen en grandes series. Daimler-Benz ha anunciado que podría iniciar la venta de coches Mercedes equipados con pilas de combustible en el año 2006.

Un transporte viable

Entre todos los sistemas para producir la energía motriz de un vehículo, generalmente el menos contaminante será el que emplea pilas de combustible. Además, el combustible ideal para este tipo de pilas, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental, es el hidrógeno. El hidrógeno puede obtenerse de muy distintas fuentes, pero al escasear y encarecerse los combustibles fósiles se hallará en el agua la fuente principal de hidrógeno obtenido mediante paneles solares. Si se generalizara el hidrógeno de origen solar, el sistema entero de transporte de energía no deterioraría el entorno, y la energía sería totalmente renovable. El precio de este combustible de hidrógeno renovable no superaría ni en 100 pesetas al de un litro de gasolina equivalente en prestaciones.

Aparte de la fuente de energía, el progreso en los aspectos técnicos del automóvil eléctrico se ha acelerado en los últimos años. Una auténtica revolución en dispositivos de almacenamiento y conversión de electricidad, controles electrónicos, programas informáticos y materiales, está descubriendo numerosas oportunidades. Por ejemplo, los avances en electrónica de potencia han dado lugar a trenes de propulsión que pesan y cuestan sólo el 40 % de sus equivalentes de diez años atrás. Hasta hace muy poco, casi todos los vehículos eléctricos se basaban en motores de corriente continua, ya que eran más fáciles de alimentar por baterías. Pero el desarrollo de inversores pequeños y ligeros (que convierten la corriente eléctrica suministrada por la batería en corriente alterna, más adecuada para alimentar un motor) permite ya abandonar la corriente continua y utilizar motores de corriente alterna. Estos son más fiables, eficaces y fáciles de mantener que los de corriente continua comparables, y además se adaptan mejor al frenado regenerativo. Sin duda alguna, el motor de un vehículo eléctrico con la electrónica de potencia que lleva asociada resulta hoy de menor tamaño, más ligero y de fabricación más económica que el motor de explosión equiparable.

Todos los grandes fabricantes de automóviles mundiales están ahora invirtiendo en desarrollo de vehículos eléctricos, así como en mejoras técnicas menos críticas, como las que afectan a la calefacción y los neumáticos del coche. Los nuevos componentes que de ello resulten serán los elementos fundamentales de unos futuros vehículos, de gran limpieza y alto rendimiento. Mientras tanto, sin embargo, muchos de los avances

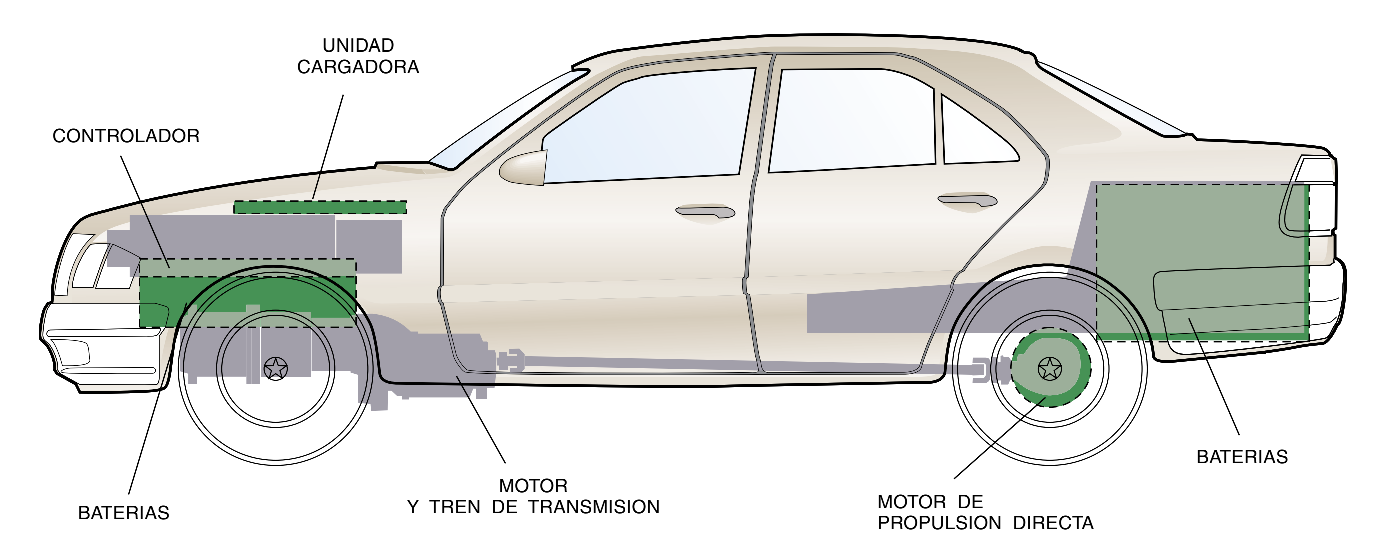
Los coches eléctricos reducen la contaminación

(cambio porcentual en las emisiones)

	HIDROCARBUROS	MONOXIDO DE CARBONO	OXIDOS DE NITROGENO	OXIDOS DE AZUFRE	PARTICULAS
FRANCIA	–99	–99	–91	–58	–59
ALEMANIA	–98	–99	–66	+96	–96
JAPON	–99	–99	–66	–40	+10
REINO UNIDO	–98	–99	–34	+407	+165
EE.UU.	–96	–99	–67	+203	+122

FUENTES: Choosing an Alternative Fuel: Air Pollution and Greenhouse Gas Impacts *(OCDE, París, 1993). Las estimaciones de EE.UU. proceden de "Emission Impacts of Electric Vehicles" de Q. Wang, M. Deluchi y D. Sperling*, Journal of the Air and Waste Management Association, *vol. 40, n.º 9, págs. 1275-1284; septiembre de 1990.*

3. LA PROPULSION ELECTRICA de automóviles universalizada permitiría, según las simulaciones, rebajar drásticamente la emisión de contaminantes urbanos. Pero algunas veces la contaminación que desprenden las centrales de energía contrarresta estas ventajas e incluso aumenta ciertos tipos de contaminación, sobre todo en países como Gran Bretaña y Estados Unidos, muy dependientes del carbón y del petróleo.



4. LA MINIATURIZACION de la electrónica y los progresos en baterías y motores han reducido hasta un 60 % el peso de los acumuladores de energía y componentes motrices de los coches eléctricos (en el dibujo, los elementos antiguos se señalan en gris, los nuevos en verde oscuro y en verde claro los coincidentes). A su vez, ello ha disminuido el peso que requiere la suspensión y la carrocería, y pueden alcanzarse prestaciones equivalentes con componentes menores.

obtenidos se están incorporando a los vehículos de combustión.

Aunque las industrias de automoción de todo el mundo han invertido tal vez más de 100.000 millones de pesetas en coches eléctricos durante los años noventa, en el contexto de la industria total esta cantidad es bastante exigua. Solamente en los Estados Unidos este sector industrial dedica más de 600.000 millones por año en publicidad, y todavía más a investigación y desarrollo. Y las compañías petroleras están gastando en este país cerca de 1,3 billones de pesetas durante la década actual, solamente para mejorar las refinerías con miras a la producción de nuevas fórmulas de gasolina con baja emisión de contaminantes.

Gran parte de la inversión acometida hasta ahora ha respondido a las presiones gubernamentales. En 1990 California aceptó el mandato ZEV (vehículo de emisión cero), en el cual se exigía que los grandes fabricantes de automoción construyeran al menos el 2 % de sus vehículos libres de emisiones en 1998, el 5 % en 2001 y el 10 % en 2003. (Estos porcentajes corresponden a una producción aproximada de unos 20.000 vehículos por año en 1998.) El incumplimiento de estas cuotas conlleva una penalización de 650.000 pesetas por cada ZEV que no se ponga a la venta. Poco tiempo después, los estados de Nueva York y Massachusetts promulgaron normas similares.

Los gigantes del automóvil lucharon encarnizadamente contra el mandato ZEV, pero enseguida ampliaron sus programas de investigación y desarrollo en automoción eléctrica para precaverse contra la posibilidad de que fallara su contraataque legal, y de que pudieran realmente surgir mercados para coches eléctricos en cualquier parte. Se quejaban sobre todo de que las normas obligaran a la industria norteamericana a suministrar un producto costoso sin dar a los consumidores incentivos para su compra —pese a que los gobiernos federales, estatales y locales estaban ya introduciendo tales incentivos.

En marzo pasado, los legisladores de California cedieron ante la presión de las industrias petroleras y del automóvil y eliminaron las cuotas prescritas para 1998 y 2001, dejando como único compromiso el de iniciar la venta de vehículos eléctricos y alcanzar la cuota final para el año 2003. Los analistas de la industria no esperan que las ventas en Estados Unidos superen en total los 5000 vehículos hasta bien iniciado el siglo próximo.

Un factor determinante del éxito de los automóviles eléctricos será, sin duda, su precio, cifra todavía muy insegura. El EV1 de General Motors, recientemente presentado, tiene un precio nominal de 4.300.000 pesetas; Solectria vende sus coches eléctricos fabricados en series cortas por cuatro a nueve millones, dependiendo de la configuración de la batería. (Hay baterías de hidruro de metal y níquel que permiten recorrer más de 320 kilómetros y que encarecen en unos cinco millones el precio de un vehículo de acumuladores de plomo.) El carácter hostil del proceso reglamentador ha estimulado a defensores y atacantes a presentar unas estimaciones no realistas, tanto por alto como por bajo; resulta, pues, imposible saber cuánto van a costar los vehículos mientras no se produzcan en serie. Sin embargo, las comparaciones con la evolución de precios de otros productos (incluidos los automóviles tradicionales) sugieren que con la producción a gran escala podrían reducirse los precios a bastante menos de la mitad de su nivel actual.

Un camino incierto

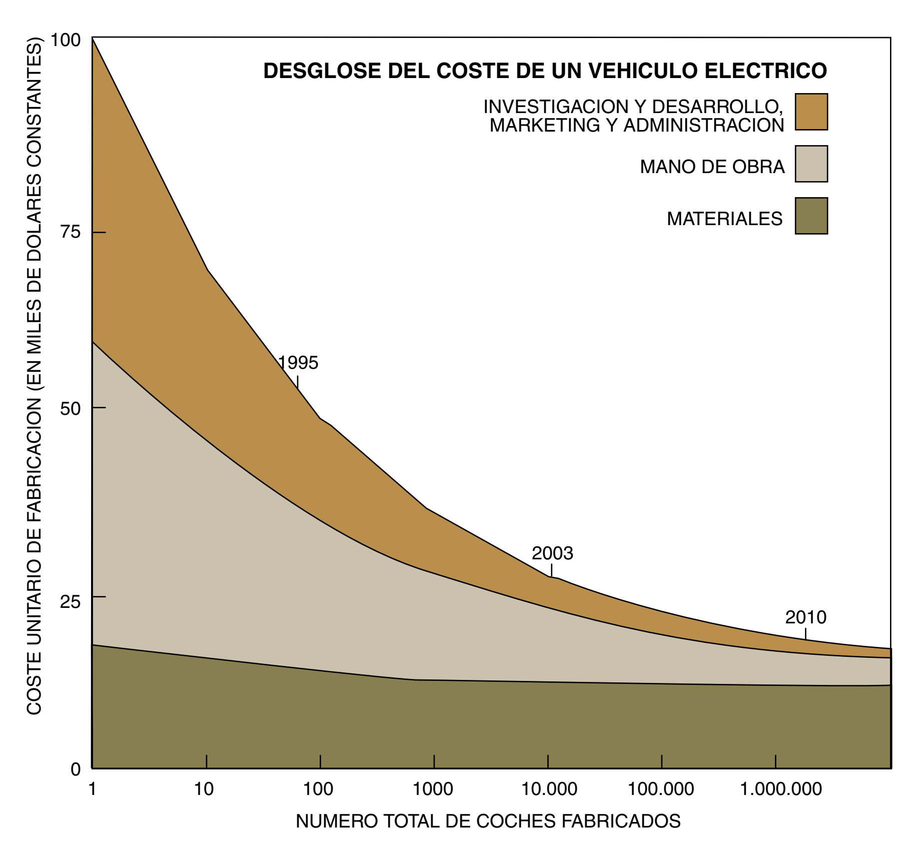
Enfrentados a una inevitable producción de vehículos eléctricos, los industriales de automoción idean estrategias para que los costes de fabricación sean bajos. Muchos de ellos, como Peugeot en Europa, se limitan a desmontar motores, depósitos de gasolina y transmisiones de los vehículos actuales y a instalar baterías, controladores y motores eléctricos sobre las mismas carrocerías y chasis con modificaciones mínimas. Otros, entre ellos Ford, venden "plataformas" (cuerpos de automóvil sin componentes de propulsión) a compañías de transformación menores que los acondicionan para tracción eléctrica. Una tercera estrategia consiste en construir vehículos muy pequeños, como el Smart de Mercedes, orientados a un nuevo segmento de mercado: los vehículos urbanos de alcance limitado. Entre todos los grandes fabricantes, hasta

ahora solamente General Motors se ha comprometido con la producción en serie de un automóvil ordinario diseñado desde el principio para tracción eléctrica.

Probablemente el coste de las baterías (y de las pilas de combustible) determinará que el precio de compra de un vehículo eléctrico supere siempre al de su equivalente en motor de gasolina. En términos de coste por kilómetro, sin embargo, el coche eléctrico y el de combustión terminarán por igualarse. El combustible de los vehículos eléctricos es muy barato, el mantenimiento que requieren es mínimo, y parece que los motores eléctricos duran notablemente más que los de gasolina. Si se considera el precio que ha de pagar la sociedad por la contaminación atmosférica, el efecto de invernadero y otros factores externos al mercado, la balanza se inclinará a favor de los vehículos eléctricos en numerosas circunstancias.

El reto de los políticos y expertos en mercado consiste en asegurarse de que los consumidores tengan en cuenta todos los costes implicados, cosa que hasta ahora ha sido difícil de conseguir. Las esperanzas que en principio hiciera concebir la citada asociación para la nueva generación de vehículos se han desvanecido ante la insuficiente financiación, las luchas políticas intestinas y las excesivas precauciones. El resultado es que los vehículos que han de construirse en 2004 serán los que tengan su diseño establecido ahora, y es probable que la asociación cubra solamente los perfeccionamientos de menor importancia en lugar de acelerar la introducción de pilas de combustible y otras técnicas radicalmente nuevas.

No obstante, parece seguro que la tracción eléctrica llegará finalmente a desterrar los motores de combustión, quizá sin grandes prisas ni con carácter uniforme y total, pero sí inevitable. La cuestión es cuándo se verificará la transición, qué forma adoptará y cómo ha de tratarse. Tal vez la lección más importante extraída del actual estado de cosas es que los gobiernos deben dar los pasos obligados: establecer amplios incentivos para incorporar los costes de factores externos tales como la contaminación a los cálculos económicos de consumidores y sociedades, y encauzar el dinero hacia técnicas innovadoras y de vanguardia en lugar de financiar el trabajo que de todos modos harían las compañías privadas.



5. POR ECONOMIAS DE ESCALA se han de poder reducir los precios de fabricación de automóviles eléctricos en cuanto se rebasen los exiguos volúmenes de producción actuales. Finalmente será el coste de los materiales lo que predomine en el coste total de un vehículo eléctrico. (Estimaciones deducidas de la experiencia de una fabricación tradicional que produzca al menos 100.000 coches por año.)

La aparición de vehículos eléctricos tiene importantes implicaciones económicas. El primero que inicie la comercialización de técnicas de tracción eléctrica a un coste competitivo hallará una buena acogida en los mercados mundiales. Los automóviles eléctricos serán muy atractivos allá donde la contaminación sea intensa e irremediable. En ellos se apreciará más la fiabilidad y el escaso mantenimiento que las prestaciones máximas, y podrán aprovecharse del menor coste de la electricidad en horas nocturnas. Y por supuesto, si los gobiernos occidentales no se deciden a actuar, es muy posible que sean los países en vías de desarrollo, donde hoy los coches son relativamente escasos, los que vean crecer la próxima generación de gigantes de la automoción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEW TRANSPORTATION FUELS: A STRATEGIC APPROACH TO TECHNOLOGICAL CHANGE. D. Sperling. University of California Press, 1988.

CHOOSING AN ALTERNATIVE TRANSPORTATION FUEL: AIR POLLUTION AND GREENHOUSE GAS IMPACTS. Distribuido por el Centro de Publicaciones e Información de la OCDE, Washington, D.C. OCDE, París, 1993.

THE KEYS TO THE CAR. James J. Mackenzie. World Resources Institute, 1994.

TAKING CHARGE: THE ELECTRIC AUTOMOBILE IN AMERICA. Michael Brian Schiffer. Smithsonian Institution Press, 1994.

FUTURE DRIVE: ELECTRIC VEHICLES AND SUSTAINABLE TRANSPORTATION. D. Sperling. Island Press, 1995.

TESTING ELECTRIC VEHICLE DEMAND IN “HYBRID HOUSEHOLDS” USING A REFLEXIVE SURVEY. Kenneth Kurani, Thomas Turrentine y Daniel Sperling en *Transportation Research*, parte D, volumen 1, n.º 2 (en prensa).

Dislexia

Un nuevo modelo de este trastorno concede a las limitaciones sufridas en el procesamiento del lenguaje una importancia primordial. Explica, asimismo, por qué a algunos les cuesta tanto aprender a leer

Sally E. Shaywitz

Hace cien años, en noviembre de 1896, un médico de Sussex publicaba la primera descripción del trastorno del aprendizaje que llegaría a conocerse como dislexia del desarrollo. "Percy F., ... de 14 años, ... ha sido siempre un muchacho inteligente y despierto", escribía W. Pringle Morgan en el *British Medical Journal*, "rápido en los juegos y en nada inferior a los otros de su edad. Su gran tropiezo ha sido —y sigue siendo— su torpeza para aprender a leer."

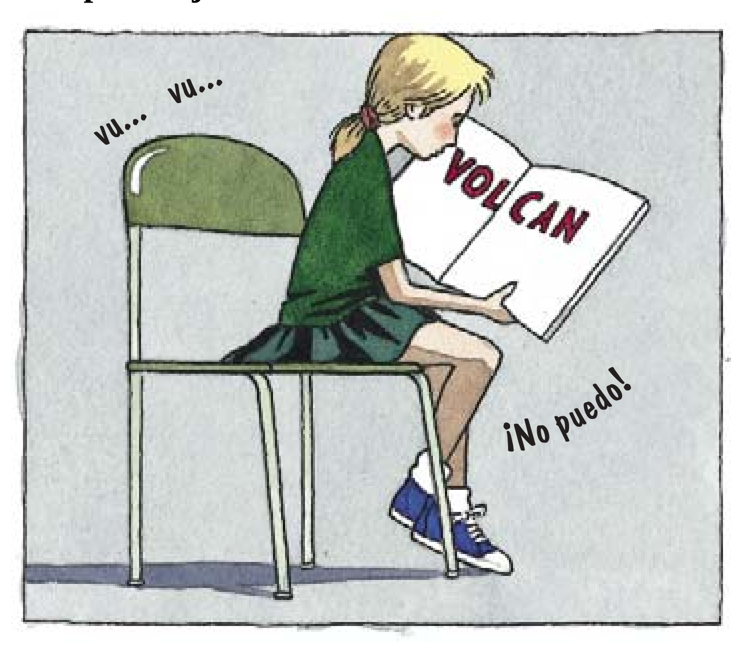
En esta breve introducción acertó Morgan a expresar la paradoja que ha venido intrigando y frustrando durante un siglo a los científicos: las profundas y persistentes dificultades que algunos sujetos brillantes encuentran cuando se disponen a aprender a leer. En 1997 lo mismo que en 1896, la habilidad en la lectura suele interpretarse signo de inteligencia, dando la mayoría de la gente por supuesto que quien sea listo y esté motivado y escolarizado aprenderá sin duda a leer bien. Pero la experiencia de millones de disléxicos, como Percy F., ha demostrado que esa suposición es falsa. La dislexia invalida la alegada relación entre inteligencia y facilidad en la lectura.

Según las primeras explicaciones de la dislexia, dadas por los años veinte de nuestro siglo, habría que atribuir a deficiencias del sistema visual lo que se creía que tipificaba la lectura disléxica, esto es, las inversiones de letras y palabras. Para superar esas presuntas limitaciones visuales se solía prescribir un entrenamiento de los ojos. Pero la investigación posterior ha demostrado que el invertir letras o palabras, trastorno al que tienden no raras veces los niños disléxicos, se debe a un defecto cognitivo relacionado con el sistema del lenguaje. Concretamente, la dislexia refleja una deficiencia en el procesamiento de las unidades lingüísticas básicas, los fonemas, de los que se componen todas las palabras habladas y escritas. Los modelos de lectura y de dislexia generalmente aceptados hoy ponen en claro por qué a algunos individuos muy inteligentes se les hace difícil aprender a leer o ejecutar otras tareas relacionadas con el lenguaje.

En el Centro para el Estudio de la Atención y el Aprendizaje adscrito a la Universidad de Yale, hemos evaluado a centenares de niños y a no pocos adultos (varones y mujeres) con carencias para la lectura. Entre los segundos abundan los alumnos y docentes de las facultades y escuelas profesionales de nuestra universidad. Recordaré a un estudiante de medicina, de nombre Gregory, que acudió al centro por haber tenido una serie de problemas en las asignaturas del primer curso. Estaba muy desanimado.

Aunque en la escuela primaria le habían diagnosticado como disléxico, también le habían puesto en un pro-

La paradoja de la dislexia





grama para estudiantes aventajados. Su inteligencia natural, junto con amplias ayudas y tutorías, le habían permitido graduarse de bachiller con bonísimas calificaciones y entrar en una universidad de prestigio. Gregory había trabajado de firme y pudo escoger entre las mejores facultades de medicina. Ahora, sin embargo, estaba empezando a dudar de su propia aptitud. No le costaba entender las intrincadas relaciones entre los sistemas fisiológicos o los complicados mecanismos de las enfermedades; sobresalía en todo lo que requiere capacidad y habilidades deductivas. Lo que constituía un problema para él era el simple hecho de pronunciar palabras largas o términos raros (tan habituales en la jerga anatómica); quizá fuese la de la memorización rutinaria la habilidad que con menos acierto había desarrollado.

Las contradicciones de su rendimiento les tenían perplejos a Gregory y a sus profesores. ¿Cómo era posible que quien comprendía tan bien conceptos difíciles se armara un lío con detalles nimios y elementales? ¿Podría deberse a la dislexia de Gregory —que como lector aún era lento— su incapacidad para nombrar partes del cuerpo y tipos de tejidos, mientras descollaba en cambio por su finura deductiva?

Sí que era posible, les expliqué. El historial de Gregory coincidía en todo con el cuadro clínico de la dislexia según se la ha definido tradicionalmente: una inesperada dificultad en el aprendizaje de la lectura, aun habiendo inteligencia, motivación e instrucción. Además, pude tranquilizar a Gregory haciéndole saber que hoy los científicos comprenden la naturaleza básica de la dislexia.

A lo largo de los últimos veinte años se ha ido configurando un modelo coherente de dislexia basado en el procesamiento fonológico. Este modelo cuadra perfectamente con los síntomas clínicos de la dislexia y con lo que los neurólogos saben sobre la organización y el funcionamiento del cerebro. Investigadores de muchos laboratorios, entre ellos nuestro grupo de Yale, hemos tenido la oportunidad de someter a prueba e ir refinando este modelo durante 10 años de investigación en psicología cognitiva y, más recientemente, neurobiológica.

El modelo fonológico

Para entender cómo funciona el modelo fonológico, hay que empezar por considerar el procesamiento del lenguaje en el cerebro. Los investigadores conciben el sistema del lenguaje como una serie jerarquizada de módulos o componentes, cada uno de ellos dedicado a un aspecto particular del lenguaje. En los niveles superiores de esa jerarquía residen los componentes implicados en la semántica (significación de las palabras o vocabulario), la sintaxis (estructura gramatical) y el discurso (sentencias o frases conexas). En el nivel inferior de la jerarquía está el módulo fonológico, dedicado a procesar los distintos elementos sonoros que constituyen el lenguaje.

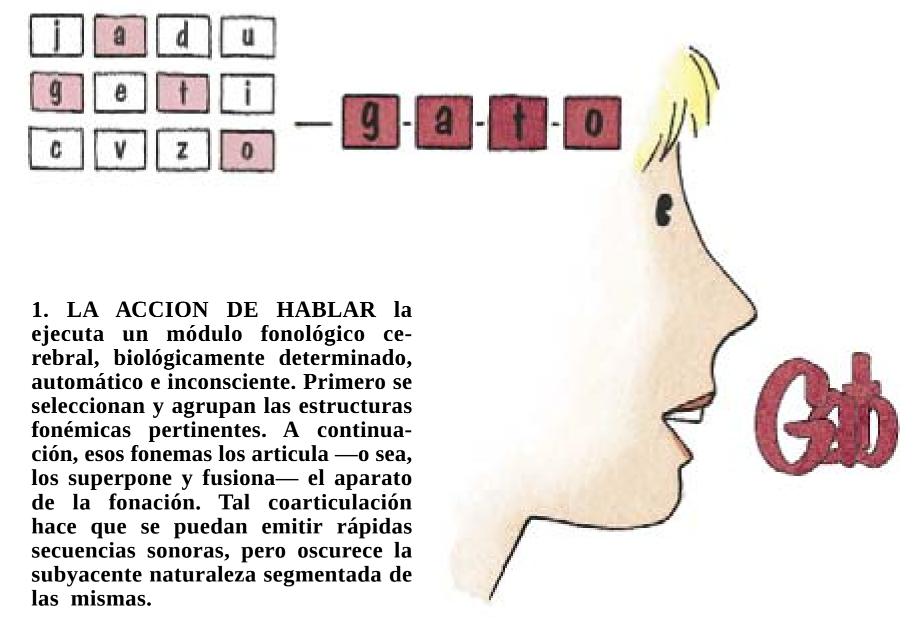
El fonema es el segmento más corto y dotado de significación del lenguaje. Constituye el elemento fundamental del sistema lingüístico. ("Cada una de las unidades fonológicas mínimas que en el sistema de una lengua pueden oponerse a otras en contraste significativo", dice del fonema la Academia.) Las diferentes combinaciones de sólo 24 fonemas —cinco vocales y diecinueve consonantes— producen todas las palabras de la lengua castellana. La palabra "gato", por ejemplo, consta de cuatro fonemas: "/g/", "/a/", "/t/" y "/o/". Antes de que las palabras puedan ser identificadas, entendidas, almacenadas en la memoria o sacadas de ella otra vez, el módulo fonológico del cerebro las ha de descomponer, segmentar en sus unidades fonéticas.

En el lenguaje hablado, este proceso ocurre de modo automático, en el ámbito de la preconsciencia. Como Noam Chomsky y, más recientemente, Steven Pinker, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han demostrado, el lenguaje es instintivo, vale decir, lo único que necesitamos los humanos para aprenderlo es ser expuestos a él. Un módulo fonológico genéticamente determinado ensambla fonemas

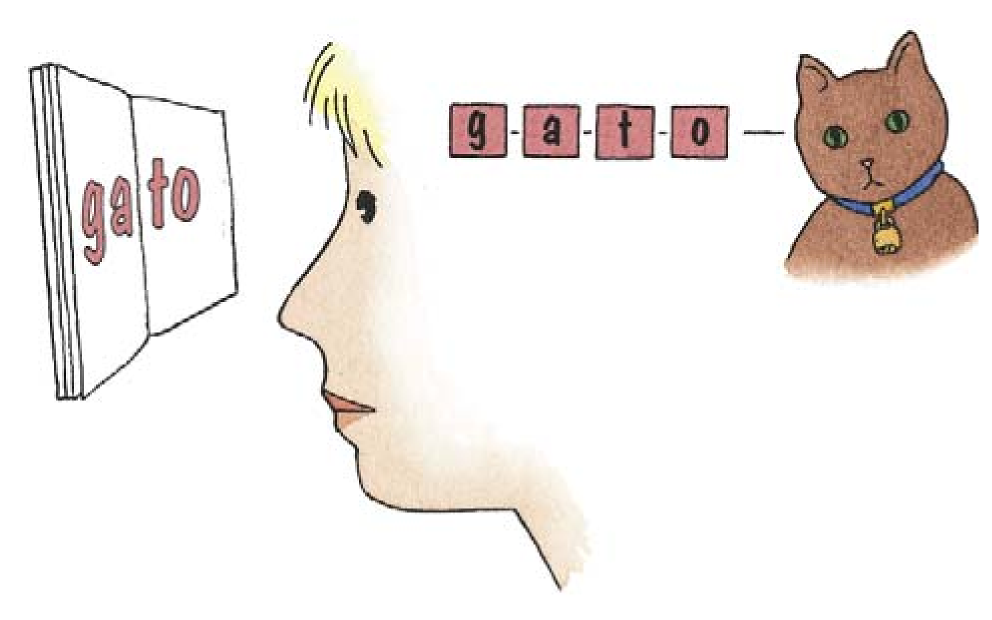
SALLY E. SHAYWITZ codirige en Yale, con Bennett A. Shaywitz, el Centro para el Estudio de la Atención y del Aprendizaje. Profesora de pediatría en la Universidad de Yale, se doctoró en la facultad de medicina Albert Einstein del Bronx. Shaywitz emplea las técnicas de la resonancia magnética funcional para estudiar el substrato neurobiológico de la dislexia en niños y en adultos.







1. LA ACCION DE HABLAR la ejecuta un módulo fonológico cerebral, biológicamente determinado, automático e inconsciente. Primero se seleccionan y agrupan las estructuras fonémicas pertinentes. A continuación, esos fonemas los articula —o sea, los superpone y fusiona— el aparato de la fonación. Tal coarticulación hace que se puedan emitir rápidas secuencias sonoras, pero oscurece la subyacente naturaleza segmentada de las mismas.



2. LA ACCION DE LEER no es un proceso automático. Debe aprenderse. El lector tiene que tomar conciencia de que las letras que ve en la página representan los sonidos de la palabra hablada: para leer la palabra "gato", ha de segmentarla o dividirla en sus unidades fonológicos subyacentes; una vez captada así, en su forma fonológica, puede ya identificarse y entenderse la palabra. En la dislexia, un módulo fonológico ineficaz produce representaciones que son menos claras y, por tanto, más difíciles de llevar a la consciencia.

en palabras para el hablante y, para el oyente, analiza la palabra hablada descomponiéndola en sus subyacentes unidades fonológicas.

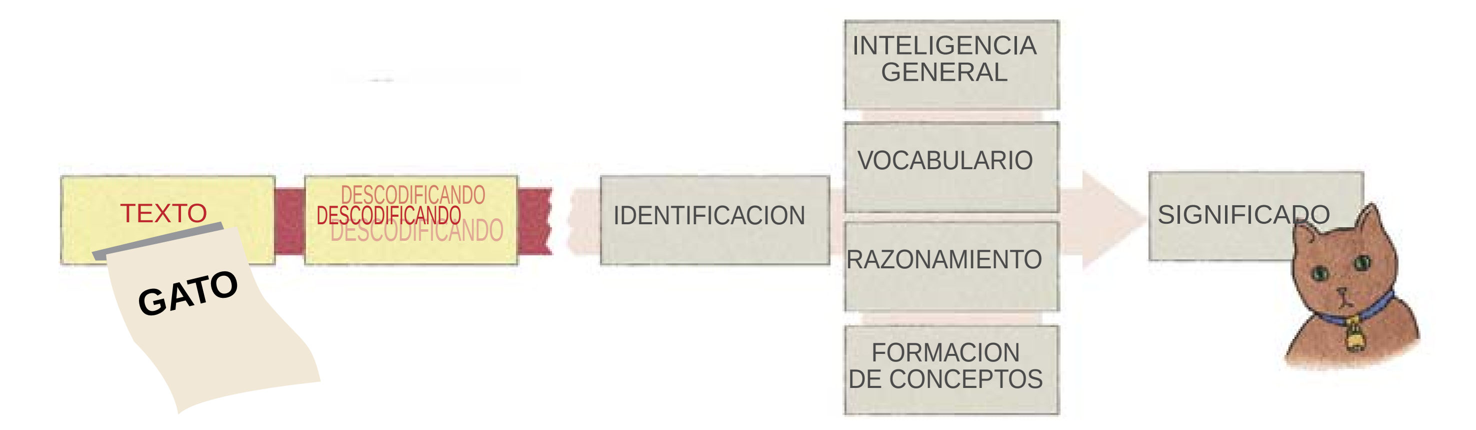
Para emitir una palabra, las partes orgánicas implicadas en el habla —laringe, paladar, lengua y labios— comprimen y fusionan los fonemas; lo hacen de forma automática. El resultado es que la información que esos varios fonemas comportan se reúne en una sola unidad sonora o 'sílaba'. Y como en la palabra hablada no hay ningún indicio manifiesto de la subyacente segmentación, cada sílaba de esa palabra parece inconsútil. Un osciloscopio registrará la pronunciación de la palabra "pan" como una sola emisión sonora; sólo nuestro sistema del lenguaje es capaz de distinguir los tres fonemas implicados en esta sílaba.

La acción de leer refleja el lenguaje hablado, señala Alvin M. Liberman, de los laboratorios Haskins en New Haven. Pero es una técnica mucho más difícil de dominar. ¿Por qué? Aunque habla y lectura se basan en el procesamiento fonológico, hay una diferencia importante entre ambos: aquél es natural, no así la lectura. Esta es algo que se crea y tiene que aprenderse de manera consciente. El lector ha de convertir los perceptos visuales del alfabeto escrito en otros lingüísticos; esto es, ha de recodificar grafemas (letras, unidades mínimas e indivisibles de la escritura) transformándolos en sus correspondientes fonemas. Después ha de comprobar que la ortografía —la secuencia de letras que ve en la página— representa esta fonología. Tal es precisamente lo que sucede cuando un párvulo aprende a leer.

En cambio, si el párvulo es disléxico, cualquier carencia en el rango del módulo fonológico de su jerárquico sistema de lenguaje aminora su capacidad de segmentar la palabra escrita y descubrir los componentes fonológicos que subyacen bajo la misma. A esta explicación de la dislexia se le llama 'modelo fonológico', o también 'hipótesis del déficit fonológico'.

De acuerdo con tal hipótesis, una carencia o defecto en el procesamiento fonológico perturba la descodificación e impide, por tanto, la identificación de la palabra. Este déficit básico en lo que es esencialmente una función lingüística de orden inferior bloquea el acceso a los procesos lingüísticos de orden superior y a la obtención del significado del texto. Así, aunque los procesos lingüísticos implicados en la comprensión y en la significación se hallen intactos, no se puede reclamar su intervención, porque sólo se accede a ellos cuando se ha identificado ya una palabra. Aunque el daño causado por el déficit fonológico es evidentísimo en la lectura, también puede afectar al habla de un modo previsible. Los titubeos de Gregory ante palabras largas o raras, por ejemplo, cuadran enteramente con el conjunto de datos que abonan un modelo fonológico de la dislexia.

Desde hace más de veinte años se vienen recogiendo pruebas en ese sentido. En uno de los primeros experimentos, Isabelle Y. Liberman, de los laboratorios Haskins, demostró que los niños, entre los cuatro y los seis años de edad, adquieren consciencia de la estructura fonológica de las palabras habladas. En el marco de la investigación, preguntaba a los pequeños cuántos sonidos oían en una secuencia de palabras. Ninguno de los de cuatro años pudo identificar correctamente el número de fonemas, pero el 17 % de los de cinco años sí que lo hicieron, y entre los de más de seis años un



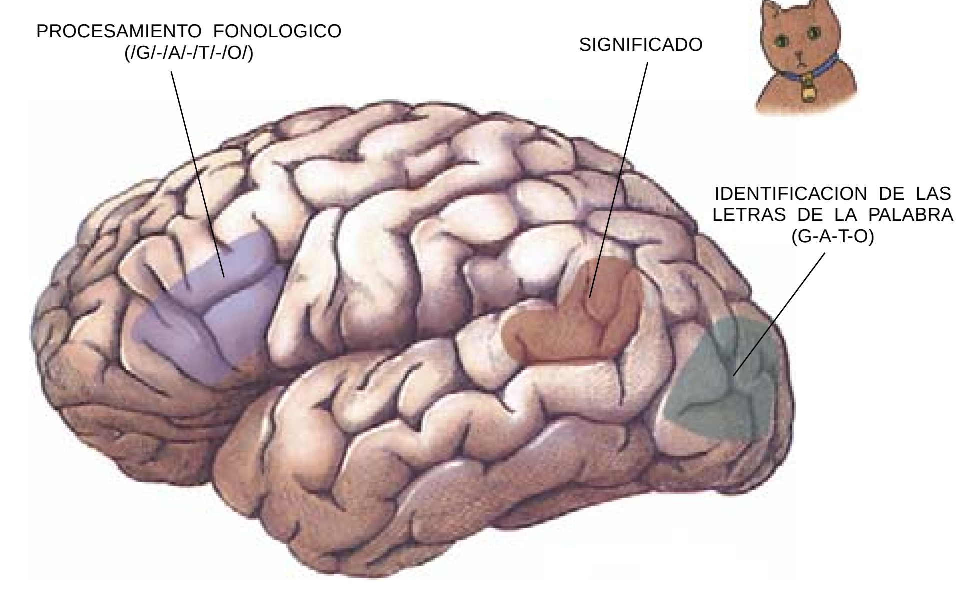
3. AL LEER una palabra (aquí "gato"), primero la descodificamos, esto es, la pasamos a su forma fonológica (/g/, /a/, /t/, /o/) y, así, la identificamos. A continuación, las funciones cognitivas de superior nivel, como la inteligencia y la memoria léxica, se aplican a entender el significado de esa palabra (aquí: "mamífero pequeño y peludo que ronronea y maúlla"). A los disléxicos, una discapacidad fonológica les impide efectuar una correcta descodificación; al leer, esa limitación les impide emplear su inteligencia y su memoria léxica del significado de la palabra.

70 % mostraron tener ya consciencia fonológica.

A los seis años de edad, la mayoría de los pequeños habían tenido también por lo menos un año entero de escolarización, incluida la enseñanza de la lectura. El desarrollo de la consciencia fonológica corrió, pues, paralelo a la adquisición de la técnica de lectura. Tal correspondencia sugería la vinculación de ambos procesos. Con esas observaciones convergen los datos del Estudio Longitudinal de Connecticut, un proyecto que mi equipo inició en 1983 con 445 párvulos elegidos al azar en jardines de infancia; el estudio continúa hoy, cuando aquellos niños tienen ya 19 años y han terminado la enseñanza media. Hemos venido sometiéndolos a pruebas anuales. Así, hemos llegado al resultado de que la dislexia afecta al 20 % de los escolares; esta cifra es compaginable con la proporción, hallada por Liberman, de los de seis años que no podían distinguir la estructura fonológica de las palabras. Se trata, en definitiva, de datos que consolidan la tesis de la conexión entre la consciencia fonológica y la lectura.

Por la vinculación de marras comenzaron a interesarse los investigadores en los años ochenta. En su trabajo pionero, Lynette Bradley y Peter E. Bryant, de la Universidad de Oxford, señalaban que una aptitud fonológica del preescolar predecía su futura destreza lectora. Ambos autores hallaron también que el entrenamiento de la consciencia fonológica aumentaba notoriamente la habilidad lectora del niño. Durante los ensayos se adiestró a un grupo de chicos en el procesamiento fonológico, en tanto que otro grupo recibía entrenamiento lingüístico que no insistía en la estructura sónica de las palabras. Por ejemplificarlo: el primer grupo se ejercitaba en clasificar las palabras de acuerdo con su sonido, y el segundo grupo las ordenaba atendiendo a su significado. Tales investigaciones, sumadas a la más reciente de Benita A. Blachman, de la Universidad de Syracuse, Joseph E. Torgesen, de la Universidad estatal de Florida, y Barbara Foorman, de la Universidad de Houston, demuestran que los progresos en la lectura no se deben tanto a la enseñanza general de la lengua cuanto al entrenamiento fonológico en particular.

Esa era la situación cuando abordamos nuestro estudio, a comienzos de los noventa, sobre las capacidades cognitivas de niños disléxicos y no disléxicos. En colaboración con Jack M. Fletcher, de la Universidad de Texas en Houston, y Donald P. Shankweiler y Leonard Katz, de los laboratorios Haskins, examiné a 378 niños de siete a nueve años de edad sometiéndolos a una batería de tests para calibrar sus dotes lingüísticas y otras. Los resultados que obtuvimos, así como los reseñados por Keith E. Stanovich y Linda S. Siegel, del Instituto de Ontario de Estudios sobre la Enseñanza, pusieron de manifiesto



4. LA ORGANIZACION NEURAL para el leer nos la ha insinuado la técnica de formación de imágenes por resonancia magnética funcional. Al identificar una letra se activa la corteza extraestriada del lóbulo occipital; el procesamiento fonológico excita el giro frontal inferior (área de Broca); y el acceso al significado activa principalmente el giro temporal superior y partes de los giros temporal medio y supramarginal.

que las limitaciones fonológicas constituyen los principales indicadores, los más notables también, de los niños disléxicos.

Hubo un test en particular que parecía revelar muy bien el fenómeno de la dislexia: el test de análisis auditivo, en el que se pide al niño que segmente las palabras según las unidades fonológicas subyacentes bajo las misma y suprima, a continuación, determinados fonemas. Por ejemplo, el niño ha de pronunciar la palabra “bloc” sin el sonido “b”, o la palabra “sur” sin el sonido “s”. Esta medida estaba en estrecha relación con la capacidad del niño para descodificar palabras sueltas en los tests normalizados, pero era independiente de la inteligencia del pequeño y de su destreza para aprender vocabulario y para razonar.

Cuando, en nuestro Estudio Longitudinal de Connecticut, aplicamos este y otros tests de consciencia fonémica a un grupo de quinceañeros, los resultados fueron los mismos: también en los alumnos de enseñanza media el mejor indicador de su futura destreza lectora residía en su consciencia fonológica.

Si la dislexia resulta de un insuficiente desarrollo de la especialización fonológica, deberían asimismo darse otras consecuencias de un funcionamiento fonológico perturbado. Y, en efecto, se dan. Hace diez años, Robert B. Katz, de los laboratorios Haskins, reseñó los problemas que presentan estos lectores con discapacidad para nombrar objetos representados en imágenes. Katz demostró que, cuando los

Juegos para aprender superando limitaciones

La dislexia es el más común de los trastornos del aprendizaje, de esas condiciones que dificultan el que un niño de inteligencia normal aprenda a hablar o a leer, o adquiera otras habilidades cognitivas. Los niños con trastornos de aprendizaje se han convertido en objetivo de una floreciente industria desde que, en 1968, las autoridades federales en materia de educación asignaran unos fondos destinados a ayudarles. En Estados Unidos, el número de niños con reconocida discapacidad para aprender aumentó desde los 780.000 en 1976 hasta los 2,3 millones en 1993. Se calcula que en la diagnosis, el tratamiento y el estudio de estos trastornos se gastan cada año unos 15.000 millones de dólares.

Las definiciones y los criterios diagnósticos para los trastornos del aprendizaje son a menudo subjetivos o ambiguos; se desconocen sus causas, o al menos son controvertidas. Gerald Coles, de la Universidad de Rochester, cuestiona el que un 20 % de los niños sean disléxicos, y no todos los investigadores y educadores aceptan una explicación fonológica (ni siquiera biológica) de la dislexia. El de su tratamiento es otro asunto erizado de objeciones y, frecuentemente, de decepciones. A lo largo de los años, padres y educadores han dado por buenas muchas técnicas que prometían ayudar a que los niños superaran sus limitaciones, aunque no se contaba con ninguna investigación que avalase semejantes promesas. Por fortuna para nosotros, la investigación sí está abriendo ahora algunas perspectivas realmente esperanzadoras.

Uno de los tratamientos de los trastornos del aprendizaje que más se vienen aceptando estos últimos años es el desarrollado por un equipo a cuya cabeza están Paula Tallal, codirectora del centro de neurología molecular y conductual de la Universidad de Rutgers en Newark, y Michael M. Merzenich, del centro Keck de neurología integradora de la Universidad de California en San Francisco. Sus investigaciones no se han centrado sobre disléxicos *per se*, sino sobre niños con “trastornos de lenguaje” a los que les cuesta entender lo expresado de viva voz. No todos los niños con trastornos de lenguaje son disléxicos —observa Tallal—, ni todos los disléxicos tienen el problema de aquéllos, pero sí se da un amplio solapamiento entre los dos grupos. De ciertas investigaciones se deduce que nada menos que un 8 % del total de los niños puede que tengan trastornos de lenguaje; entre éstos, más del 85 % son también disléxicos.

Tallal, que empezó a estudiar los trastornos de lenguaje a finales de los años setenta, abriga fundadas sospechas de que este problema resulta de la incapacidad para procesar con suficiente rapidez la información auditiva. Mientras la mayoría de los niños pueden procesar fonemas que duran menos de 40 milisegundos, los que sufren trastornos quizá necesiten que los fonemas duren hasta 500 milisegundos. Para ellos, la palabra “bar” podría ser indistinguible de la palabra “par”. Esta hipótesis —dice Tallal— es “compatible” con el modelo del déficit fonológico en la dislexia, pero subraya más el papel de la temporización del procesamiento neural.

Cree Tallal que los trastornos de lenguaje tienen un fundamento orgánico más que ambiental. Las exploraciones de resonancia magnética y otros trabajos de formación de imágenes —dice ella— han puesto de manifiesto claras diferencias neurales entre las personas sin y con problemas de lenguaje. “Pero el que algo tenga bases biológicas no significa, ni mucho menos, que carezca de remedio”, añade Tallal.

Hace dos años esta investigadora formó un equipo con Merzenich y con otros científicos para desarrollar una terapia de corte informático, una suerte de videojuego con el que instruir a los niños con problemas de lenguaje. El núcleo de la terapia lo constituye un programa de procesamiento de las palabras que permite a los expertos alterar la amplitud y la duración de los sonidos registrados.

LA NIÑA DE CINCO AÑOS KEILLAN LECKY se ejercita con un programa de aprendizaje del habla en la Universidad de Rutgers en Newark, N. J.

En uno de los programas, de esquema circense, un payaso pronuncia dos sílabas muy afines en sonoridad, por ejemplo “pa” y “ba”, alargándolas de modo que a los niños les sea fácil captarlas. Cuando éstos distinguen correctamente entre los dos sonidos, el payaso les felicita; el progreso viene también representado por un oso que se mueve haciendo equilibrios a lo largo de una cuerda floja.

disléxicos equivocan los nombres de los objetos, las respuestas incorrectas tienden a compartir características fonológicas con la respuesta correcta. Por otra parte, el error al nombrar no se debe a una falta de conocimiento. Al mostrar a cierta niña disléxica la imagen de un volcán lo llamó 'tornado'; mas, al concedérsele la oportunidad de explicarse, evidenció que conocía muy bien el objeto representado —hasta el punto de describir con gran detalle los atributos y las actividades de un volcán y señalar otras imágenes relacionadas con volcanes—; simplemente, no conseguía formar la palabra "volcán".

Estos datos, en convergencia con otros muchos, sugieren que, en la dislexia, se encuentra lesionado el componente fonológico del sistema del lenguaje, mientras que los componentes de nivel superior permanecen intactos. Los procesos lingüísticos implicados en la significación de las palabras, en la gramática y en el discurso —que en conjunto subyacen a la comprensión— parecen hallarse plenamente capacitados para cumplir su misión, pero su actividad está bloqueada por alguna carencia en la inferior o más básica función del procesamiento fonológico. En uno de nuestros ensayos, Jennifer, joven muy lista aunque con discapacidad para la lectura, nos lo dijo todo acerca de la palabra "apocalipsis": sabía su significado, sus connotaciones y su uso correcto; sin embargo, era incapaz de reconocer la palabra en una página impresa. Y es que, como no lograba descodificar e identificar la palabra escrita, tampoco podía acceder a su conocimiento del significado cuando se le cruzaba en la lectura.

Ni que decir tiene que, como Gregory, muchos disléxicos aprenden a leer e incluso destacan en los estudios. Tales disléxicos compensados, así se les califica, logran puntuaciones tan altas como los no disléxicos en tests de exactitud verbal, porque han aprendido a descodificar o identificar las palabras, consiguiendo con ello acceder a los niveles superiores del sistema del lenguaje. Pero les cuesta gran esfuerzo. Los tests cronometrados revelan que la descodificación sigue siéndoles muy trabajosa a los disléxicos compensados, que no son ni automáticos ni fluidos en la identificación de las palabras. No pocos disléxicos nos han confesado que la lectura les cansa, prueba del enorme empeño y energía que han de dedicar a la tarea. De hecho, una extrema lentitud en tomar decisiones de cuño fonológico es típica del grupo de disléxicos compensados que hemos reunido en el marco de un nuevo enfoque para abordar la dislexia: nuestro programa de formación neural de imágenes.

Neurobiología de la lectura

El modelo fonológico incluye un esquema modular de procesamiento cognitivo en el que cada uno de los procesos componentes que se emplean en la identificación de una palabra lo ejecuta una red específica de células cerebrales. Pero hasta hace poco los investigadores no podían apoyarse en ninguna indicación sólida del trazado de ese esquema en el seno de la compleja organización funcional del cerebro. A diferencia de otras funciones, la de la lectura no puede estudiarse en los animales. Durante muchos años, la localización cerebral de los procesos cognitivos superiores sólo podía inferirse de los efectos que las lesiones producían en la conducta de quienes sobrevivían a ellas. Tan

---

Una vez los niños dominan ya fonemas de determinada duración —pongamos, por ejemplo, 400 milisegundos—, pueden pasar a otros más rápidos y reales. A los niños se les hace escuchar también alargamientos de palabras enteras, frases e historietas, como, por ejemplo, *Don Gato en su tejado*. En un trabajo que apareció en *Science* hace ahora justamente un año, Tallal y Merzenich informaron que 11 niños tratados con estos métodos habían adquirido en un solo mes la destreza en el lenguaje que suele costar dos años. Un grupo de control, al que se le dio idéntica terapia pero sin alargar los sonidos, solamente progresó una cuarta parte.

Tallal, Merzenich y otros dos colegas han fundado la sociedad Principios Científicos del Aprendizaje, con sede en San Francisco, para crear y comercializar un CD-ROM interactivo que contendrá su programa de aprendizaje. Se proponen examinar a prototipos en 25 o más escuelas y clínicas de educación especial, en los EE.UU. y en el Canadá, a lo largo del año que empieza. Calculan someter a esas pruebas a unos 500 niños.

Los trabajos versarán no sólo sobre niños con trastornos de lenguaje, sino también sobre los diagnosticados de dislexia, de atención deficiente y de otros trastornos del aprendizaje habituales. "Queremos ver en qué medida es generalizable esta técnica", dice Tallal. A ella y a sus colegas la prensa y los padres les acosan con preguntas y consultas. En parte para satisfacer a estas demandas, el equipo ha creado una dirección en la "Telaraña" (WWW): (http://www.scilearn.com).

Reconoce Tallal que las cuestiones planteadas por Coles y otros escépticos sobre las causas y la frecuencia de los trastornos del aprendizaje no dejan de tener su importancia. Sin embargo, piensa que "es un error insistir en todas esas diferencias en torno a la definición". El auténtico progreso —dice ella— sólo se conseguirá mediante la investigación empírica.

John Horgan

Consejas en torno a la dislexia

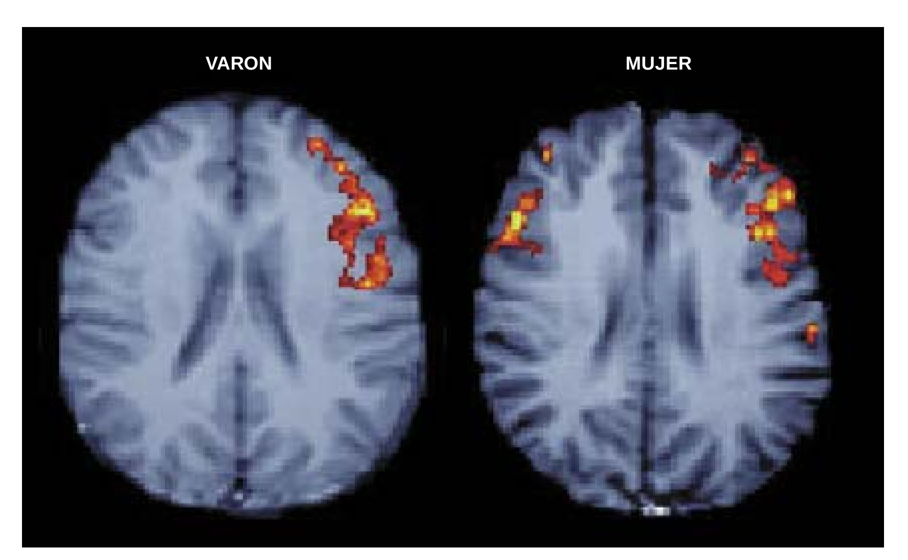
La escritura especular es un signo de dislexia
Escribir al revés e invertir letras y palabras son cosas comunes en las primeras fases del desarrollo de la escritura, lo mismo entre los niños disléxicos que entre los no disléxicos. Aquéllos tienen dificultades para nombrar las letras, pero no para copiarlas.

Entrenar la mirada es un buen tratamiento para corregir la dislexia.
Veinte años largos de investigación han demostrado que la dislexia refleja un trastorno del lenguaje. No hay prueba alguna de que el entrenamiento ocular cure el trastorno.

La dislexia se da más en los chicos que en las chicas.
Ciertamente las limitaciones en la lectura se observan más a menudo entre los chicos, pero las investigaciones indican que esa apreciación se debe a un prejuicio, pues la frecuencia del trastorno viene a ser pareja en ambos sexos.

La dislexia puede eliminarse por completo.
El control anual de las habilidades fonológicas desde el preescolar hasta el final del bachillerato patentiza que el trastorno persiste en la edad adulta. Aunque muchos disléxicos aprenden a leer con precisión, siguen leyendo lentamente y no de manera automática.

La gente inteligente no puede ser disléxica.
La inteligencia no tiene nada que ver con el procesamiento fonológico, como lo prueba la existencia de muchísimas personas de brillante talento y disléxicas: William Butler Yeats, Albert Einstein, George Patton, John Irving, Charles Schwab y Nicholas Negroponte, y tantos otros.



5. DIMORFISMO SEXUAL en los patrones de activación cerebral durante la lectura, puesto de relieve en estas imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional. Durante el procesamiento fonológico, los varones muestran una activación unilateral, en el giro frontal inferior izquierdo. En las mujeres, el procesamiento fonológico activa los giros frontales inferiores izquierdo y derecho.

indirecto enfoque aportaba escasa luz a los fenómenos que nos interesaban a nosotros. Necesitábamos poder acotar las zonas del cerebro que se activan cuando los sujetos sanos leen o se empeñan en ello.

De ahí el alborozo con que, en las postrimerías de la década de los ochenta, nuestro equipo recibió la introducción de la técnica formación de imágenes por resonancia magnética funcional (RMF). Utilizando la misma máquina de barrido que ha revolucionado la exploración clínica, la técnica RMF puede medir los cambios de la actividad metabólica del cerebro mientras el individuo está realizando una tarea cognitiva. Constituye, pues, un medio ideal para cartografiar la respuesta del cerebro al estímulo de la lectura y otros similares. Por tratarse de un método que no es invasivo ni emplea radioisótopos, la RMF resulta excelente para trabajar con niños.

Desde 1994, varios colegas de Yale colaboran conmigo en el empleo de la técnica RMF para investigar la neurobiología de la lectura. Bennett A. Shaywitz, Kenneth R. Pugh, R. Todd Constable, Robert K. Fulbright, John C. Gore y la autora han utilizado esta técnica con más de 200 niños y adultos, disléxicos y no disléxicos. Los resultados obtenidos nos facultan para esbozar, siquiera sea de forma provisional, la organización neural de la lectura de una palabra impresa. En particular, la identificación de las letras activa zonas de la corteza extraestriada, dentro del lóbulo occipital; el procesamiento fonológico se produce dentro del giro frontal inferior; y el acceso al significado requiere la activación de áreas situadas en los giros temporales medio y superior del cerebro.

Nuestra investigación ha revelado ya un sorprendente dimorfismo sexual en el *locus* de la representación fonológica de la lectura. En los varones, el procesamiento fonológico ocupa al giro frontal inferior izquierdo; en las mujeres, amén de activarse éste, se excita también el giro frontal inferior derecho. Estas diferencias de lateralización habían sido sugeridas por estudios del comportamiento, pero hasta ahora nunca se habían demostrada de forma tajante. Nuestros hallazgos suministran la primera prueba concreta del dimorfismo sexual en la organización del cerebro para cualquier función cognitiva. El hecho de que el cerebro de la mujer tienda a tener representación bilateral para el procesamiento fonológico explica muchas observaciones que provocaban desconcierto: por qué, después de una lesión que afecta al lado izquierdo del cerebro, es menor entre las mujeres que entre los hombres la probabilidad de sufrir importantes menguas de las habilidades lingüísticas, y por qué las mujeres tienden con mayor frecuencia que los hombres a compensar la dislexia.

Consagrados a descifrar el fenómeno de la dislexia, nos parece sumamente interesante la identificación de las áreas cerebrales que, al leer, se dedican al procesamiento fonológico. Supone ello contar con una posible "firma" neurobiológica de la lectura. El aislamiento de tal firma trae consigo la promesa de un diagnóstico más preciso de la dislexia. Es posible, por ejemplo, que la neurofirma del procesamiento fonológico proporcione la medida más sensible del trastorno. Además, el descubrimiento de una firma biológica del acto de leer ofrece una oportunidad sin precedentes para evaluar los efectos de las intervenciones en los sistemas neuroanatómicos que ejecutan el proceso de lectura.

Contextualizando

El modelo fonológico es una exacta cristalización de lo que nosotros entendemos por dislexia: una discapacidad encapsulada, a menudo circuida de significativos esfuerzos al razonar, al resolver problemas, al conceptualizar, al pensar críticamente y al emplear el vocabulario. Los disléxicos compensados, como Gregory, pueden usar el "enorme cuadro" de las teorías, modelos e ideas para ayudarles a recordar detalles concretos. La verdad es que, cuando los detalles no están unificados por ideas asociadas o por marcos teóricos —cuando, por ejemplo, Gregory ha de aprender de memoria largas listas de nombres poco corrientes—, los disléxicos pueden hallarse en auténtica desventaja. Aunque Gregory consigue memorizar esas listas, le cuesta mucho pronunciar tales nombres en un momento preciso, como debe hacerlo al ser preguntado por el médico residente en la ronda de visitas a los enfermos del hospital. El modelo fonológico predice, y la experimentación ha demostrado, que la memorización rutinaria o "de carretilla" y la rápida evocación o rememoración de las palabras se les hacen especialmente difíciles a los disléxicos.

Aun cuando el individuo conoce la información, si necesita recordarla con rapidez y presentarla oralmente, resulta que evoca fonemas afines u ordena incorrectamente los tomados. En tales circunstancias, los disléxicos suelen salpicar su elocución con muchos 'ums', 'eeeh' y otros titubeos. Por lo demás, cuando no se le apremia a que responda enseguida, el disléxico puede lograr una excelente presentación oral. Asimismo, al leer, mientras los no discapacitados pueden descodificar automáticamente las palabras, los

individuos como Gregory necesitan a menudo recurrir a la ayuda del contexto para identificar determinadas palabras. Esta estrategia les hace ir más lentos, por lo cual, para que en los exámenes muestren los disléxicos lo que realmente saben, es necesario darles un tiempo extra. Las denominadas "pruebas objetivas" (exámenes "tipo test"), en las que se ha de elegir una entre varias de las respuestas que se proponen, penalizan a los disléxicos tanto por la falta de suficiente contexto como por el formato de las cuestiones.

Sin embargo, nuestra experiencia en el Centro de Yale sugiere que muchos disléxicos compensados gozan de clara ventaja sobre los no disléxicos en su capacidad para razonar y conceptualizar, y que el déficit fonológico enmascara lo que son con frecuencia excelentes facultades de comprensión. Actualmente en muchas escuelas y universidades se conoce bien la natural limitación de la dislexia y se valora el rendimiento de los estudiantes disléxicos mediante ensayos y preparadas disertaciones orales, mejor que con exámenes memorísticos y pruebas "objetivas". Así como los investigadores han empezado a penetrar en el sustrato neural de la dislexia, los educadores comienzan a reconocer las implicaciones prácticas de este trastorno. Al cabo de un siglo desde que W. Pringle Morgan describiera la dislexia que afectaba a Percy F., la sociedad quizá pueda entender por fin la paradoja de tal trastorno.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVIDENCE THAT DYSLEXIA MAY REPRESENT THE LOWER TAIL OF A NORMAL DISTRIBUTION OF READING ABILITY. Sally E. Shaywitz, Michael D. Escobar, Bennett A. Shaywitz, Jack M. Fletcher y Robert Makuch en *New England Journal of Medicine*, vol. 326, n.º 3, págs. 145-150; 16 de enero, 1992.

SEX DIFFERENCES IN THE FUNCTIONAL ORGANIZATION OF THE BRAIN FOR LANGUAGE. Bennett A. Shaywitz, Sally E. Shaywitz, Kenneth R. Pugh, R. Todd Constable, Pawel Skudlarski, Robert K. Fulbright, Richard A. Bronen, Jack M. Fletcher, Donald P. Shankweiler, Leonard Katz y John C. Gore en *Nature*, vol. 373, págs. 607-609; 16 de febrero, 1995.

TOWARD A DEFINITION OF DYSLEXIA. G. Reid Lyon en *Annals of Dyslexia*, vol. 45, págs. 3-27; 1995.

El arte rupestre del Africa meridional

Las pinturas y los grabados realizados por antepasados de los pueblos san cifran la historia y la cultura de una sociedad de miles de años de antigüedad

Anne Solomon

Aron D. Mazel, del Museo Natal, y yo llevábamos andando tres horas largas por los pastizales de las estribaciones de los montes Drakensberg, en KwaZulu-Natal. No encontramos un alma en el camino. Por fin, llegamos a una cueva espaciosa, semiescondida tras los arbustos y la caída de una cascada. Detrás de esa cortina de agua se hallan algunos de los ejemplos más depurados de la pintura rupestre san, o bosquímana, de Sudáfrica. El agua no ha dañado esa pinacoteca antigua; sí los vándalos. Ante nosotros, paredes pintadas con más de 1600 figuras humanas y animales, implicadas en un sinfín de actividades. Pasamos la noche en la caverna. Al clarear del día siguiente, reanudamos el viaje. Para su análisis posterior, recogimos escamas mínimas de pintura de 10 creaciones distintas, pertenecientes a los yacimientos de los alrededores. Volvimos a Ciudad del Cabo.

El pigmento que habíamos rascado de la pintura de un antílope africano (el mayor antílope local) contenía fibras vegetales microscópicas. Mazel y Alan L. Watchman, dueño éste del laboratorio Data-Roche Watchman, atribuyeron a las hebras una antigüedad de unos 400 años. Una determinación tan tajante no suele ser lo habitual. En efecto, la mayoría de las representaciones del arte rupestre están hechas en ocre, un óxido de hierro hidratado, de diversos colores: rojo, marrón o amarillo. O lo que es lo mismo, las pinturas carecen de carbono orgánico y, por tanto, no podemos recurrir al método de datación del radiocarbono, que mide la desintegración constante del isótopo 14 del carbono en la materia orgánica.

La fecha más antigua corresponde a una cueva de Namibia. En el suelo, excavado, aparecieron losas pintadas, se supone, hace entre 19.000 y 26.000 años. Pero el resto de las representaciones son ya, verosímilmente, del Holoceno, es decir, de los últimos 10.000 años aproximadamente.

Los autores de esas representaciones figuran entre los primeros habitantes de Africa meridional, los antepasados de los pueblos san contemporáneos. El término "san" tiene connotación lingüística: las lenguas san y khoi (antes hotentote) constituyen el grupo khoisan, al que pertenecen varias docenas de lenguas y dialectos emparentados, que se caracterizan por sonidos sibilantes. Los san desarrollaron una economía de pueblo cazador y recolector, comportamiento que ha sido objeto de estudio al tomarse por modelo de la vida verosímil que llevarían los primeros grupos humanos.

Los khoi eran pastores. Hace unos 1500 o 2000 años los pastores khoi y grupos de agricultores, ya en la edad de Hierro, emigraron hacia el sur, a territorio san. Las huellas de ese contacto quedaron registradas en las escenas con ovejas de rabo grueso que los khoi llevaron consigo, así como en las que aparece ganado, assegais (lanzas) y escudos, que forman parte de la cultura agropecuaria de la edad de Hierro.

Aunque podemos entresacar de las pinturas retazos de esa historia, la falta de fechas fiables impide cualquier reconstrucción concatenada. Sólo respecto a lo que sucedió a partir del siglo XV, cuando los europeos "descubrieron" Africa del Sur, empezamos a tener una visión más vertebrada de las condiciones históricas. En 1652, los holandeses establecieron el primer asentamiento permanente en Ciudad del Cabo. Conforme los colonos expandían su dominio, menudearon los enfrentamientos con los pueblos indígenas, y el estilo de vida san sufrió una rápida erosión. A los robos de ganado y caballos por los san respondían los colonos europeos con *razzias* devastadoras. Comunidades enteras de san fueron así masacradas. Los grupos supervivientes acabaron absorbidos en núcleos agrícolas y pastoriles o

ANNE SOLOMON es investigadora adscrita a la Universidad de Ciudad del Cabo, por la que se doctoró. Ha estudiado la asignación de roles masculinos y femeninos en el arte rupestre san. Miembro del comité de la Sociedad Arqueológica Sudafricana, forma parte del consejo editorial del *South African Journal of Field Archaeology*.



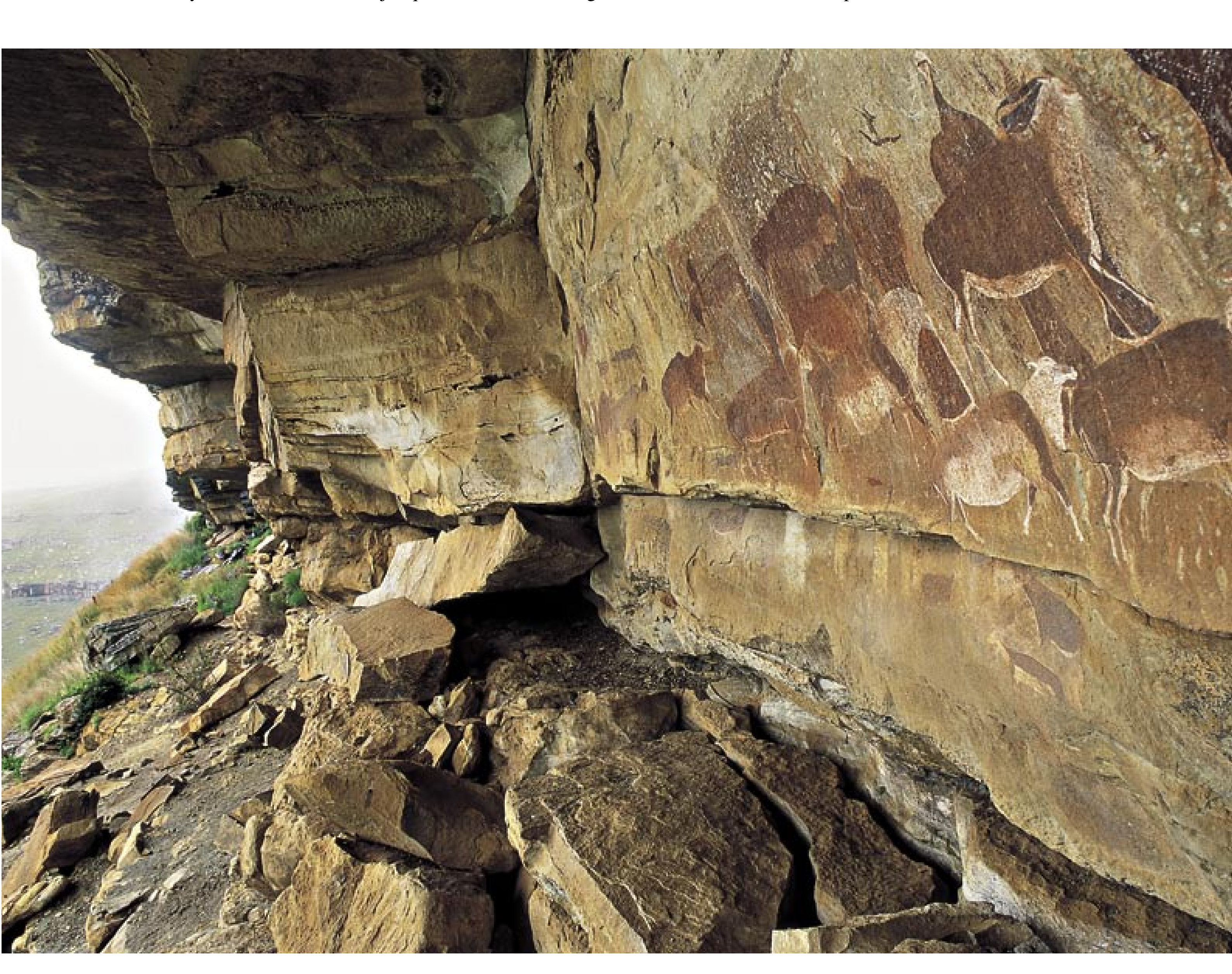
1. POR TODO EL AFRICA meridional (*arriba*) se extienden las representaciones del arte rupestre. Arte que propagaron, por vastísimas zonas los pueblos san. Sirvan de botón de muestra estas pinturas de antílopes africanos y seres humanos (*derecha*) de la reserva natural Kamberg en KwaZulu-Natal. (Salvo indicación en contra, todas las pinturas que se muestran aquí proceden de KwaZulu-Natal.).

se convirtieron en jornaleros de las propiedades europeas.

Desapareció hace tiempo la tradición pictórica. Salvo en ciertas zonas de Botswana y Namibia, sólo muy pocos entre quienes han conservado el uso de la lengua san mantienen el modo de vida de sus antepasados. Hasta en esas zonas tan remotas están bajo presión las tierras y las tradiciones de sus mayores. Han empezado a surgir movimientos nacionalistas que se proponen hacer frente a la expoliación reiterada que han sufrido los khoisan, no sólo por la ley del blanco, sino también por otros africanos. Pero la amplia distribución de yacimientos arqueológicos, topónimos y arte rupestre da fe de los extensos territorios que estos pueblos ocuparon antaño.

Al estudiar el arte, el arqueólogo debe seguir todas las pistas imaginables. Hay dos clases de trabajo que se solapan: las pinturas, que suelen aparecer en cavernas y en abrigos someros, y las piedras con grabados, encontradas en zonas más secas. Los grabados, más abstractos en su formalización, han tardado en despertar el interés de los investigadores. El estilo y el tema de las pinturas varía de unas regiones a otras. A veces, en un mismo yacimiento se combinan varios estilos, y entonces resulta imposible decir si se trata del trabajo de diferentes artistas contemporáneos o de creaciones pertenecientes a períodos históricos distintos. Los primeros investigadores sugirieron que las figuras más sencillas y elementales, monocromáticas, eran las más antiguas, y que el abanico de colores y la complejidad estilística habían ido evolucionando con el tiempo. Hoy sabemos que no existe esa sencilla correlación. Algunas de las obras más toscas son probablemente las más recientes (quizás el arte de pastores y de niños).

Con mucho, los motivos más frecuentes son figuras humanas, normalmente desnudas y de perfil. La mayoría parecen varones, pero estudios cuantitativos realizados por Patricia Vinnicombe (ahora en el Departamento de Asuntos Aborígenes del gobierno de Australia Occidental), Harald Pager y otros demuestran que no puede identificarse el sexo de la mitad al menos de las figuras. También privilegiaron los grandes herbívoros. Por todo Sudáfrica predominan las representaciones del antílope *Tragelephus oryx*. En Zimbabwe, apenas se pinta esta especie; se prefiere el kudu (*T. strepsiceros*). Pinturas de elefantes se encuentran con frecuencia en la provincia del Cabo sudoccidental, pero no aparecen casi nunca en las cuevas





de los montes Drakensberg, hacia el nordeste.

Como han demostrado las excavaciones, el énfasis puesto en determinadas especies no es un mero reflejo de la fauna local, ni se corresponde con los animales más importantes desde el punto de vista de la dieta. A excepción de las serpientes, los san raramente pintaron reptiles e insectos. Para mayor perplejidad, el interés mostrado por retratar el paisaje es casi nulo.

Pero los arqueólogos cuentan con un factor valiosísimo: el amplísimo testimonio de los hablantes de la lengua san, lo que facilita la interpretación del arte rupestre. Sin duda, el material más rico fue el recogido, hace un siglo, entre gente que hablaba una lengua san conocida como !xam (el carácter inicial es un sonido silbante). En efecto, en 1870 fueron encarcelados en Ciudad del Cabo un grupo de hombres !xam de la provincia del Cabo septentrional, acusados de delitos que iban del mero hurto al asesinato. Wilhelm H. I. Bleek, filólogo alemán, consiguió su custodia. Construyeron cabañas en un extremo de su finca y trabajaron de criados, pero sobre todo aportaron relatos de sus tradiciones. Mientras Bleek se concentraba en el lenguaje, su cuñada Lucy C. Lloyd anotaba la mayoría de las más de 10.000 páginas de tradición !xam que se publicaron en *Specimens of Bushman Folklore*, escrito por W. H. I. Bleek, L. C.





2. LA DANZA, acompañada por las palmas y el canto de armónicos melódicos, forma parte integrante de la vida san. Las mujeres pueden danzar solas, como en la pintura de la izquierda. Se ven algunas portando “delantales” de cuero, que todavía siguen utilizándose. El detalle (*derecha*) de una danza procedente de otra pintura representa probable-



3. RITO PARA PROVOCAR LA CAIDA DE LLUVIA. Esa es la interpretación que se le asigna con mayor verosimilitud a esta representación del animal cazado por chamanes (*izquierda*) y pintado en ocre rojo. El hombre que tira del rabo del antílope (*arriba*) es también otro chamán. En la mitología san el antílope constituye el animal favorito de Dios; junto con otros grandes herbívoros se le asocia a la lluvia.

Lloyd y G. M. Theal (George Allen, Londres, 1911).

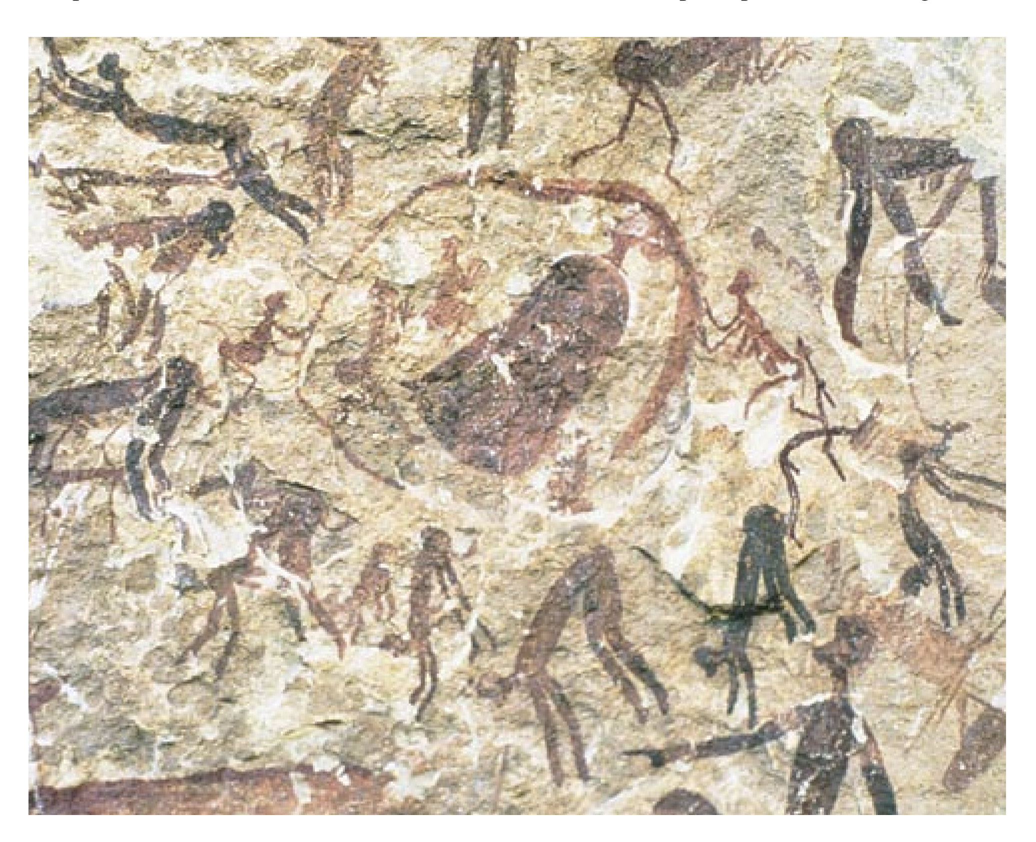
Para provocar la lluvia

Por desgracia, los !xam ya no pintaban ni grababan. Tampoco podían dar cuenta fundada de las representaciones. Sólo se dispone de una narración que detalla el proceso de la pintura. En los años treinta, una tal señora How encontró a cierto anciano sotho de nombre Mapote. Este le comentó a How que, en su juventud, él y sus hermanastros "solían pintar en un extremo de una caverna mientras los bosquímanos pintaban en el otro". Al recrear la actividad, Mapote utilizó pinceles fabricados con plumas insertadas en juncos y pidió sangre de un antílope africano recién sacrificado para mezclarla con sus pigmentos. Pintó antílopes africanos, caama (*Alcelaphus buselaphus*), leones y seres humanos. Aunque no podemos estar seguros de que ese proceder fuera el seguido en el pasado remoto, Mapote aportó una seductora instantánea de cómo se realizó el arte rupestre.

El testimonio !xam demostró que las escenas de caza no revestían la importancia que los arqueólogos les habían concedido. Con bastante fiabilidad podemos admitir que algunas representaciones que en un principio se creyeron escenas de caza, indicaban, por contra, un ritual de atracción de la lluvia. Para los !xam las nubes desencadenantes de la lluvia eran animales que caminaban por el campo sobre "patas" de lluvia torrencial. Los brujos provocadores de la lluvia tenían que sacar de su refugio a un inmenso herbívoro mítico y conducirlo a un abrevadero, transportarlo a un lugar elevado y sacrificarlo; donde corriera su sangre, caería la lluvia. Los animales de la lluvia representados semejan herbívoros grandes, como antílopes o hipopótamos, dotados sin embargo de facciones y proporciones extrañas. Los pueblos khoi y san conservan aún creencias similares sobre la lluvia. A principios de este siglo, un



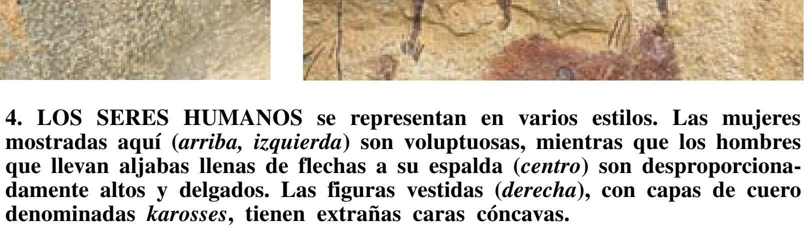
mente una ceremonia de iniciación femenina. Encima de estas líneas, la familia san !kung celebra el éxito de una cacería en el Kalahari bailando en la noche. Obsérvense los brazaletes de cáscara de huevo de avestruz que lleva en la rodilla la mujer de la esquina izquierda; recuerda a las decoraciones con puntos blancos de las figuras pintadas.











4. LOS SERES HUMANOS se representan en varios estilos. Las mujeres mostradas aquí (*arriba, izquierda*) son voluptuosas, mientras que los hombres que llevan aljabas llenas de flechas a su espalda (*centro*) son desproporcionadamente altos y delgados. Las figuras vestidas (*derecha*), con capas de cuero denominadas *karosses*, tienen extrañas caras cóncavas.

antropólogo dejó constancia de una ceremonia khoi en la que se realizaban sacrificios animales e incorporaba muchas características de las descritas por los !xam.

Se discute el grado de literalidad con que deben interpretarse tales vinculaciones. J. David Lewis-Williams, de la Universidad de Witwatersrand, es un viejo defensor de la idea según la cual muchas pinturas ilustran sesiones de curación ritual. Las comunidades de Botswana y Namibia practican todavía esas ceremonias. Durante una danza ritual, que puede durar toda la noche, los chamanes entran en un estado alterado de consciencia, inducidos por el movimiento rítmico, los cantos y las palmas. En ese estado alucinatorio, acceden al mundo de los espíritus y adquieren poderes sobrenaturales que les permiten solucionar los problemas que acosan al poblado, enfermedad incluida.

Diversos aspectos del arte rupestre parecen revelar cierta relación con el chamanismo. Algunas figuras presentan rayas rojas bajo la nariz: un chamán en trance puede llegar a sangrar por la nariz. El equipo de Lewis-Williams ha llegado incluso a postular que las alucinaciones chamánicas podrían haber motivado los primeros impulsos pictóricos. Puesto que todos los seres humanos, razonaron, compartimos un mismo entramado nervioso, las formas alucinatorias visuales se repetirían a lo largo del tiempo y, por ende, los diseños geométricos del paleolítico y de la edad del Bronce europeos, así como el arte de los indios norteamericanos, cabría entenderlos en

a



b



5. VARIOS ANIMALES aparecen en el arte san. El mamífero nocturno de la especie *Orycteropus afer* (*a*) procede de la Reserva Castle Game de Giant en Sudáfrica. Sobre el mismo se han dibujado figuras humanas. Las jirafas (*b*) son de los montes Erongo en Namibia. Algunos animales de la lluvia se parecen a un hipopótamo (*c*); éste proviene de Zimbabwe. El rhebok (*d*) es un animal de caza. Si miramos bien, advertiremos que la pintura

términos de experiencias en estado de alucinación.

Ventana a la cultura

Mi opinión va por otros derroteros. Atribuyo la diversidad del arte a derivaciones y motivaciones múltiples. Algunos estudiosos han observado las notables semejanzas existentes en la mitología de grupos san muy alejados entre sí en el espacio y en el tiempo. Todos los pueblos san hablan de un tiempo primitivo en el que los animales eran personas. Estas, después de un episodio de creación inicial, se diferenciaron. Pero eran gentes necias, carentes de tradiciones y refinamientos. Sólo después de una segunda creación se convirtieron en los san actuales. (Según otro relato, bastó una sola creación para que los hombres se convirtieran completamente en seres humanos, pero fueron necesarias dos para las mujeres.)

Corren muchos relatos que narran la historia de esos pueblos animales. Algunos explican los orígenes del fuego, de los cuerpos celestes y de fenómenos físicos. Oímos por qué el babuino no tiene pelo en las nalgas, por qué la gente se casa y por qué la muerte es inevitable. Otras tradiciones orales hablan de encuentros con vecinos belicosos o peligrosos carnívoros. La alimentación es una preocupación constante y en un sorprendente número de historias se alude a la autofagia (comerse partes de uno mismo). Aunque el tema de la autofagia pudiera estar relacionado con el alto valor simbólico atribuido a la carne, la verdad es que no sabemos nada más de su sentido. Las narraciones escenifican los dilemas de la existencia a los que se enfrentaban los cazadores-recolectores san y priman la preocupación por la muerte y la regeneración.

La creencia de que los animales fueron una vez personas facilita la interpretación de los teriantropos (figuras con rasgos de hombre y de bestia). Esas y otras pinturas quiméricas podrían evocar los seres del mundo primordial. Pero podrían tener una explicación distinta: algunas podrían reflejar la experiencia de transformación física del chamán durante un trance (cuando los chamanes entran en el reino de los espíritus de la muerte). Ahora bien, puesto que todos habrían conocido el mundo mítico, habría también no chamanes entre los artistas.

Curiosamente, bastantes seres de su mundo mitológico no aparecen nunca representados. Para Lewis-Williams, esa omisión obedece a la mayor vinculación del arte con el ritual que con la mitología. Sin embargo, muchas tradiciones orales describen la relación entre nuestro mundo y el de los espíritus y exponen la cosmovisión de los san. Y así, aunque el arte no ilustra los mitos, se sirve del mismo repertorio de creencias religiosas. La mitología proporciona, pues, el contexto para la representación artística y el ritual. Resulta harto probable que un buen número de escenas se pintaran durante actos rituales o en ocasiones asociadas a los mismos.



6. EL TERIANTROPO (con caracteres mixtos de animal y hombre) se inscribe en la tradición religiosa san. En el principio, los animales eran humanos; sólo se diferenciaron después de un episodio de creación. Esta criatura parece llevar un pequeño antílope sobre su espalda.

Entre las cuevas que he investigado, hay una, situada en la región sudoccidental del Cabo, con abrumador predominio de figuras femeninas. Este insólito fenómeno, aquí y en cual-

c



d



contiene dos rheboks superpuestos. (El segundo aparece con la cabeza hacia abajo). Se creía que los humanos y los grandes herbívoros poseían *n!ow*, un poder ligado al nacimiento, la muerte y el tiempo: el buen *n!ow* trae lluvia, mientras que el mal *n!ow* está asociado a condiciones adversas. Tal vez la preferencia de los san por retratar seres humanos y grandes herbívoros tenga que ver con que ellos poseen *n!ow*.





quier otro lugar, sugiere que algunas oquedades podrían haber sido lugares rituales reservados para las mujeres, quizás en conexión con la iniciación femenina (una ceremonia, de historia consolidada, que se celebra cuando las niñas alcanzan la madurez sexual). Contra el criterio de muchos, no parece defendible que el arte fuera un coto exclusivo de los varones.

En relación con la interpretación de la sexualidad, parece que los san veían en la mujer que había alcanzado la madurez una amenaza para los varones y la comunidad. Los !xam creían que las mujeres iniciadas podían convertir a los hombres en piedra o en árboles con la sola mirada. Sin embargo, pese al miedo de sus peligrosos poderes, la llegada de una mujer a la edad adulta era causa de celebración. (La iniciación masculina parece haber sido un rito mucho menos importante.)

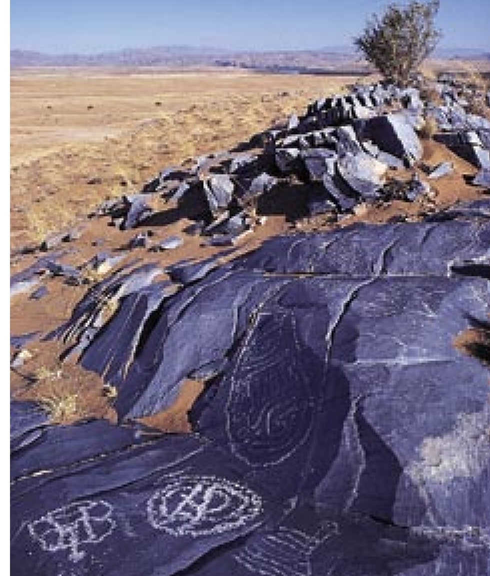
Las sociedades san eran paritarias. Todos compartían el acceso a los recursos. Lo que no impide que, en los grupos estudiados por los antropólogos, gocen de ciertas ventajas los varones. Su estatuto se ve reforzado por ser ellos los que proveen de carne al grupo; se deja para las mujeres la recolección de raíces y frutos. Parece que sólo los varones eran brujos provocadores de la lluvia; en los grupos san modernos, hay más varones que mujeres chamanes. La verdad es que la mayoría de los yacimientos extensos y con gran densidad de pinturas se caracterizan por la pobreza de figuras femeninas. Es posible que los lugares con predominio claro de la representación de un sexo se pintaran con motivo de la celebración de ritos reservados al mismo.

Ni que decir tiene que las pinturas y los grabados donde entran en escena los colonos europeos pueden ser perfectamente registros de acontecimientos reales. Además, las representaciones manifiestan vinculaciones entre los grupos san y otros pueblos. John H. Parkington y la Unidad de Investigación de Arqueología Espacial de la Universidad de Ciudad



7. EL ENCUENTRO con los europeos, sus armas de fuego y sus caballos quedó retratado en este abrigo de Beersheba, en KwaZulu-Natal. Muchos san fueron asesinados en *raids* de venganza blanca. Hoy los san, que en una época vagaban por todo el Africa meridional, están confinados a unas pocas bolsas cada vez más reducidas.





8. GRABADOS de zonas áridas, la elección de cuyos temas constituye un misterio. La roca de la izquierda, procedente del norte de la provincia del Cabo en Sudáfrica, muestra antílopes. (Cerca de la parte superior izquierda hay figuras representadas por rayas de una pareja europea, probablemente añadida más tarde.) Animales de distintas especies aparecen también cincelados en este lado de un farallón en Khorixas, Namibia. Pero muchos grabados, como los del desierto de Namibia meridional (*arriba*), muestran figuras abstractas. Se cree que esos modelos brotaron en momentos de trance y alucinación.

del Cabo han sugerido que las impresiones de manos encontradas a lo largo de la costa sudoccidental, superpuestas por lo común a creaciones precedentes, pudieron realizarlas pastores khoi. Las representaciones de ganado introducidas por los pastores y campesinos inmigrantes, así como los artefactos de hierro, las mazorcas de maíz y los abalorios encontrados en las excavaciones dan fe de la participación de los san en otras economías africanas.

Sin fecha

En cierto modo, sin embargo, las etapas de desarrollo del arte rupestre siguen escapándosele al historiador. El principal problema reside en la datación. La espectrometría de masas permite a veces la datación por carbono radiactivo de las cantidades residuales de materia orgánica contenida en la sustancia aglutinante que se mezcló con el pigmento. Pero las posibilidades de contaminación de las muestras constituye un obstáculo formidable. A ello hemos de añadir que los artistas san no parece que emplearan siempre aglutinantes. Nuestra mejor información procede del material de la pared de las cavernas y se ha depositado en los estratos arqueológicos del suelo. El carbón vegetal y otras sustancias orgánicas presentes en tales sedimentos sí pueden fecharse por el método del radiocarbono y suministrar así una edad aproximada.

Aunque hallazgos de ese tipo son raros, Royden Yates y Antonieta Jerardino, de la Universidad de Ciudad del Cabo, han desenterrado, en una caverna de la costa oeste, losas pintadas que se remontan unos 3500 años atrás. Y, además de la caverna que Mazel y yo visitamos en KwaZulu-Natal, otro yacimiento ha aportado una fecha precisa. En la provincia sudoccidental del Cabo, los arqueólogos de la Universidad de Ciudad del Cabo han obtenido muestras de una figura humana pintada en negro. Realizada verosímilmente con carbón vegetal, la pintura contenía carbono suficiente para emplear la técnica de datación radiactiva: se le asignó una antigüedad de unos 500 años (140 años más o menos).

Datación aparte, quedan muchos problemas pendientes. Muchas zonas se hayan todavía sin explorar. Cada nuevo descubrimiento, cada nueva interpretación, plantean preguntas y dan pie a controversias sin fin. En su calidad de registro singular y archivo sugeridor de un pasado, el arte rupestre san se está convirtiendo en parte de la cultura sudafricana subsiguiente a las estructuras racistas del apartheid. Pero las representaciones se hallan amenazadas por la erosión lenta y exfoliación de la roca, cuando no se las ensucia con graffiti. Por su parte, las piedras grabadas y expuestas a cielo abierto están desapareciendo. Gracias al esfuerzo conjunto de especialistas procedentes de distintas disciplinas abrigamos la esperanza de que el arte rupestre perdure, a modo de testamento de una antigua cultura africana, trágicamente desplazada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NDEDEMA. Harald Pager. Akademische Druck-u Verlaganstalt, Graz, 1971.

PEOPLE OF THE ELAND. Patricia Vinnicombre. Universidad de Natal Press, 1976.

BELIEVING AND SEEING: SYMBOLIC MEANINGS IN SOUTHERN SAN ROCK PAINTINGS. J. David Lewis-Williams. Academic Press, 1981.

HUNTERS AND HERDERS OF SOUTHERN AFRICA. Alan Barnard. Cambridge University Press, 1992.

MISCAST: NEGOTIATING THE PRESENCE OF THE BUSHMEN. Dirigido por Pippa Skotnes. University of Cape Town Press, 1996.

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Mucho ruido y pocas nueces

No me cabe duda de que todos los científicos de éxito, profesionales o aficionados, tuvieron una obsesión inicial por descubrir algo. La experiencia de realizar un hallazgo original, de saber que nadie antes tuvo nuestra perspicacia, es una auténtica droga. Y no hay mejor manera de alimentar esa adicción que ampliando las posibilidades de nuestro laboratorio. El artículo del mes pasado versó sobre la forma de hacer el vacío, proceso que abre maravillosas posibilidades para explorar la naturaleza. El de este mes completa la exposición describiendo cómo medir presiones muy bajas.

Para cubrir la gama de presiones conseguibles mediante el sistema de vacío que les describí en el artículo de diciembre se necesitan dos vacuómetros diferentes. Uno es un vacuómetro mecánico, que reacciona directamente a la fuerza que las moléculas gaseosas aplican a un diafragma; con él se pueden registrar presiones de hasta un torr. (Un torr es la presión necesaria para elevar una columna de mercurio una altura de un milímetro. Una atmósfera equivale a 760 torr aproximadamente.) Por debajo de estos niveles hay que recurrir a dispositivos más sensibles, tales como el vacuómetro de Pirani, que infiere la presión de otras propiedades de los gases relacionadas con ella. Algunos de estos vacuómetros pueden trabajar por encima de un torr, pero son mucho más incómodos que los mecánicos. Además de los vacuómetros, se necesita un dispositivo que los conecte al vacío.

El vacuómetro mecánico es una adaptación de la técnica para detectar micromovimientos del estilo de los latidos “cardíacos” de insectos que les describí en octubre del año pasado. Se basa en el movimiento de un imán y un transductor de efecto Hall (HET), un microcircuito barato que permite detectar minúsculas variaciones del campo magnético. Puede adquirirse en tiendas de componentes electrónicos o en Honeywell Micro Switch, de Freeport (Illinois); pida el modelo número SS94A1F.

Empiece por derramar una gota de epoxia por todo el borde de la boca de un tarro de mayonesa usado y apriete contra él una lámina fina de mylar. Una vez secada, pegue con epoxia un imán de tierras raras (Radio Shack; n.º de pieza 64-1895) al centro de la lámina. Después, cubra bien de epoxia uno de los bordes de un tubo en T de latón de 6,5 mm de diámetro.

Adhiera ese borde al mylar, asegurándose de que está centrado en torno al imán. Una vez seca la epoxia, con una navaja recorte con cuidado el mylar siguiendo el borde del tarro y con maña elimine el mylar sobrante del tubo en T. Por último, fije el HET al tubo de tal modo que su superficie sensible esté centrada respecto a la membrana de mylar. Pegue con epoxia una arandela de 6,5 mm al borde del tubo y luego fije con pegamento el HET a la arandela. Asegúrese de que el sensor HET se halla encima mismo del imán.

Cuando la presión dentro de la T disminuya, el mylar se combará hacia adentro y hará que el imán se aleje del HET. Emplee el circuito para señales de variación lenta descrito en octubre pasado para registrar ese desplazamiento. Tendrá que hallar la ganancia correcta mediante tanteos. Si se ajusta demasiado alta, el amplificador de instrumentación se saturará enseguida y no servirá; demasiado baja, la medición no será tan sensible como debiera.

Por lo que concierne al resto del dispositivo de conexión, podrá construirlo con una inversión modesta en piezas de fontanería de latón, todas de 6,5 mm de diámetro. Cubra

1. La medición de un vacío se lleva a cabo con unos dispositivos construidos en torno a un tubo en T. El vacuómetro mecánico, que emplea un microcircuito transductor de efecto Hall (HET), puede medir presiones muy pequeñas, de sólo un torr. El vacuómetro de Pirani emplea una bujía de incandescencia y alcanza el dominio del militorr

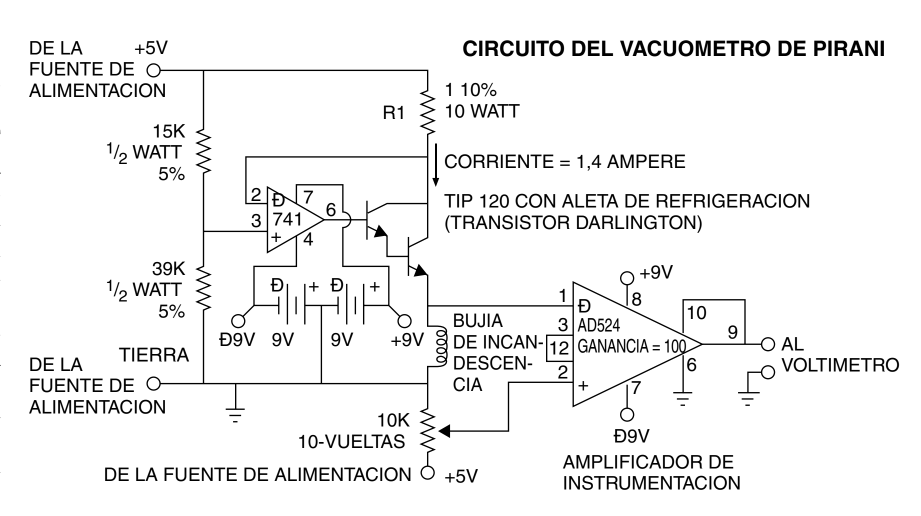
completamente de epoxia las roscas de dos piezas conocidas como adaptadores de arpón para manguera. Enrósquelas ceñidamente en una T de tubo de latón y pegue con epoxia un trozo corto de tubo en el centro de la T. En el otro extremo de ese tubo, conecte la T que contiene el vacuómetro mecánico. Con tubos de tygon (búsquelos en las ferreterías) enlace los adaptadores al tubo de 6,5 mm de diámetro de su sistema de vacío.

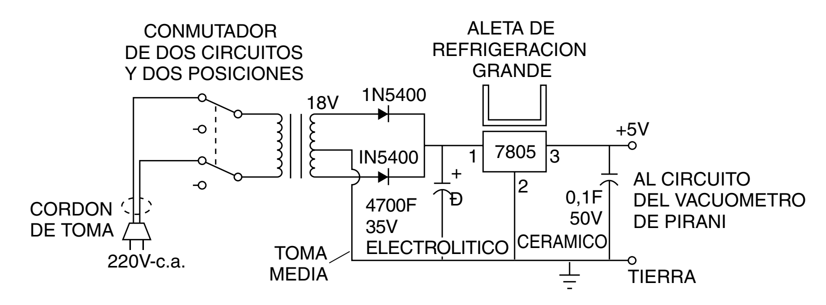
Mi modesto vacuómetro, que logré montar en una hora, toca fondo hacia unos dos torr. Hay multitud de maneras de mejorar las prestaciones del instrumento; yo les invito a experimentar con variables tales como el espesor del mylar, la superficie de la membrana, la electrónica, las técnicas constructivas, etc. Me agradará dar cuenta de sus novedades en la página de la Society for Amateur Scientists en la World Wide Web.

Pero ni siquiera los vacuómetros mecánicos más refinados podrán detectar presiones inferiores al torr. Para llegar a esos valores se requiere una solución más ingeniosa. Resulta ser que la capacidad de un gas para conducir el calor es casi independiente de la presión en una gama de presiones sorprendentemente amplia. Cerca de un torr, no obstante, el gas se hace tan tenue que su conductividad térmica empieza a disminuir. Esta caída prosigue hasta que la conductividad térmica se acerca a cero en torno al militorr. Podemos sacarle partido a esa relación y medir presiones entre un torr y un militorr.

El instrumento más simple capaz de medir conductividades térmicas es el vacuómetro de Pirani. Me descubro ante Bruce R. Kendall, de la Universidad estatal de Pennsylvania, por haber desarrollado un tipo de vacuómetro de Pirani maravillosamente sencillo, robusto y barato. El corazón del sensor de Kendall es una bujía de incandescencia: un filamento de aleación de platino empleado en el encendido de algunos tipos de motor, por ejemplo, los diésel. Pero el instrumento de Pirani requiere una versión más reducida de la bujía de incandescencia, del tipo que se emplea en aeromodelismo. Podemos encontrarlas en las tiendas especializadas a un precio discreto. Quien esto firma ha logrado unos resultados satisfactorios con la O.S. Engine modelo A5.

El dispositivo de Kendall se apoya en el cambio que la resistencia eléctrica de los metales experimenta con la temperatura. Kendall conecta





2. El circuito de arriba suministra una corriente de intensidad constante al vacuómetro de Pirani. El de abajo convierte la electricidad doméstica en una corriente continua de cinco volt

su bujía a una fuente de corriente constante y luego mide la diferencia de tensión entre sus extremos. La presión determina la velocidad a la que el conductor despide calor, lo cual a su vez cambia su temperatura y, por tanto, su resistencia. Puesto que la resistencia no es sino la tensión que aparece entre los extremos del conductor dividida por la corriente que lo atraviesa, esa resistencia cambiante produce una variación de unos pocos milivolt, que puede medirse fácilmente.

Necesitaremos una fuente de corriente constante, capaz de dar 1,4 ampère aproximadamente. El circuito de la figura 2 se construye sin dificultad y hace la faena. El circuito se basa en un microcircuito AD524, un notable amplificador de instrumentación producido por Analog Devices. También puede el aficionado construirse un amplificador de instrumentación con tres amplificadores operacionales del tipo 741 como se explicó detalladamente en el número de octubre pasado.

Advertencia: Dentro de la fuente de alimentación acechan serpientes enroscadas. Protéjase de las tensiones de la red y meta el circuito dentro de una caja. La primera vez que lo construí, el condensador de 4700 microfarad reventó porque lo instalé con los bornes invertidos (y no pudo aguantar la intensidad de corriente). Los jóvenes experimentadores no deberían construir este circuito sin la supervisión de un adulto. Como genera una respetable cantidad de calor, abriremos unos cuantos orificios de ventilación de 3 o 4 mm en el reverso de la caja. Hay que dar salida al calor producido por el 7805, o el microcircuito se recalentará y se cortará la corriente. En las tiendas de radio se venden aletas de refrigeración baratas y pastas que aseguran un buen contacto térmico con la pastilla.

El circuito de la fuente de alimentación puede suministrar una corriente máxima continuada de 1,5 ampère. El vacuómetro de Pirani suele consumir una corriente nominal de 1,4 ampère, pero su valor exacto depende mucho de la resistencia de gran disipación (rotulada “R1” en el esquema). La resistencia de un ohm suele tener un 10 por ciento de tolerancia, lo que significa que su valor real puede

variar entre 0,9 y 1,1 ohm. Si fuese inferior a 0,95 ohm, puede que el consumo de corriente resulte excesivo para la fuente de alimentación. Con un multímetro digital asegúrese de que la resistencia es superior a 0,95 ohm.

Para acoplar el vacuómetro de Pirani al recinto de vacío, se taladra un pequeño orificio en un tapón de latón de 6,5 mm y se pasa por él dos conductores aislados. Se conectan uno de ellos a la carcasa de la bujía de incandescencia y el otro al electrodo situado en su fondo, de tal modo que la bujía descanse lo más cerca posible del tapón de latón. Luego se pinta con esmalte el cuerpo del vacuómetro (¡pero no el filamento!) para aislarlo eléctricamente del recinto de vacío. Llene a conciencia de epoxia el orificio; atornille el tapón a la T de latón. Debería ser posible hacer estanca la unión arrollando cinta de teflon en torno a las roscas del tapón antes de atornillarlo, pero yo tuve que recurrir a la epoxia. (La cinta de teflon permitiría retirarlo para operaciones de mantenimiento posteriores, mientras que, cuando a mí se me queme la bujía, tendré que reconstruir todo el conjunto.)

Yo nunca tuve que calibrar un vacuómetro y quizá tampoco el lector se vea en la necesidad de hacerlo, pues muchas aplicaciones no requieren más que una estimación tosca de la presión. Y ello es una suerte, porque calibrar un vacuómetro de baja presión puede convertirse en un tormento, ya que su respuesta no suele ser una función lineal de la presión. Los vacuómetros de Pirani son incluso peores, porque responden de forma distinta según el gas que en cada caso se esté evacuando.

Quien se empeñe en calibrar sus vacuómetros, tendrá que compararlos con otros instrumentos calibrados. Le sugiero que recurra a científicos de su localidad, a quienes siempre les agradará abrir las puertas de sus laboratorios para proyectos de esa índole. Pero por cuidadosamente que haya calibrado el lector su vacuómetro, suerte tendrá si puede determinar la presión dentro de un factor de dos en condiciones de trabajo reales.

Para mayor información sobre proyectos científicos para aficionados, visite la página World Wide Web de la Society for Amateur Scientists en http://www.thesphere.com/SAS/.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Guía para la datación informática

En el año 46 antes de Cristo, el calendario romano estaba perdiendo la sincronía con las estaciones. Por consejo del astrónomo alejandrino Sosígenes, Julio César introdujo un día supernumerario en uno de cada cuatro años, el año "bisiesto", al objeto de que la duración media del año fuese de 365 1/4 días. Sus sacerdotes no comprendieron bien la regla y contaron el cuarto año de cada ciclo como el primero del siguiente, con lo que los años bisiestos iban de tres en tres. El error no quedó corregido del todo durante 50 años.

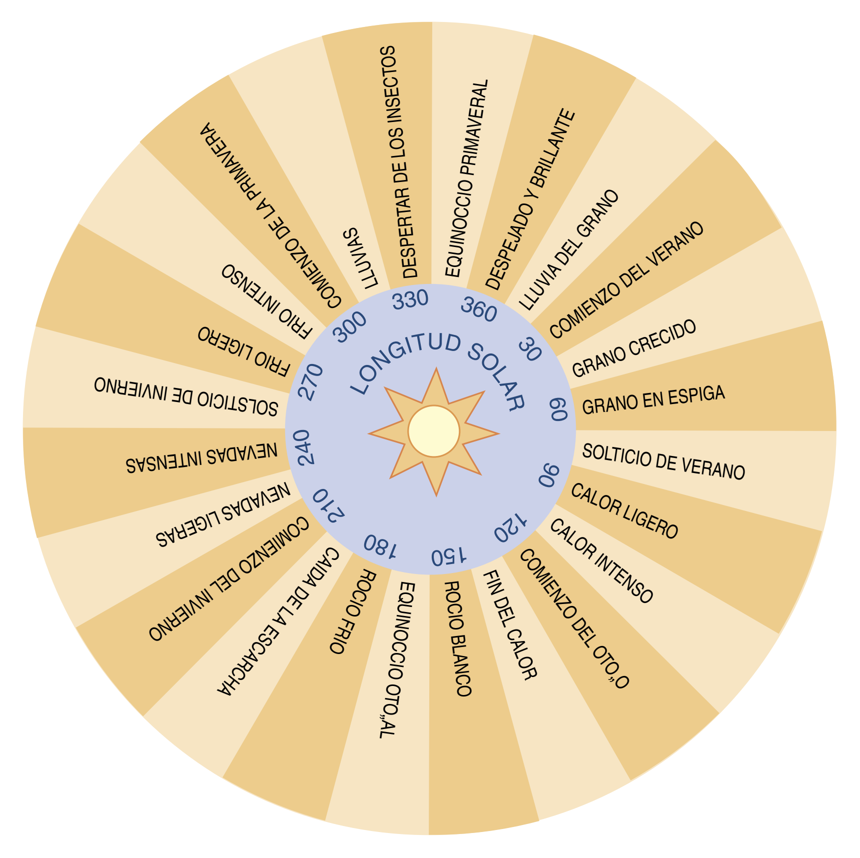
No hay por qué volver a cometer errores de datación como ésos. Hace unos diez años, Nachum Dershowitz y Edward M. Reingold, de la Universidad de Illinois, decidieron desarrollar almanaques y calendarios para el editor GNU Emacs, un sistema basado en Unix. De este proyecto salió un código informático para la conversión de fechas desde un sistema de calendas a otro. Los 14 calendarios de que dispone son el gregoriano, el ISO (Organización Internacional de Normalización), el juliano, el copto, el etíope, el islámico, el persa, el baha'i, el hebreo, el maya, el de la Revolución Francesa, el chino, el hindú antiguo y el hindú moderno.

Los calendarios varían de unas culturas a otras porque todos ellos se esfuerzan en conseguir lo imposible: racionalizar lo irracional. Nuestras unidades de tiempo se basan en tres ciclos astronómicos, a saber, el día, el mes y el año. El día solar medio, dividido en 24 horas, es el período transcurrido entre dos pasos sucesivos del Sol por el cénit. El período entre dos lunas nuevas sucesivas constituye el mes sinódico medio, que dura 29,530588853 días. El tiempo necesario para que el Sol retorne a una misma posición de su trayectoria aparente define el año trópico medio, que dura 365,242199 días. Si el período lunar fuese de 29,5 días y el período solar de 365,25, la Luna repetiría su movimiento exactamente cada 59 días ($2 \times 29{,}5$) y el Sol, cada 1461 días ($4 \times 365{,}25$). Por tanto, cada 86.199 días (59×1461) el sistema formado por la Tierra, la Luna y el Sol regresaría exactamente a su misma posición relativa. Un calendario cuyo ciclo fuese de 86.199 días permanecería sincronizado eternamente (despreciados los cambios lentos provocados por la fricción de las mareas.)

Por desdicha para los diseñadores de calendarios, las razones entre días, meses y años se comportan como si fuesen números irracionales; esto es, no expresables mediante fracciones con números enteros (al menos, usando números relativamente pequeños). En consecuencia, los ciclos lunares y solares nunca retornan exactamente al mismo estado.

En la práctica, la mayoría de las culturas optan, ora por un calendario solar, procediendo a ajustar los meses, ora por un calendario lunar, dejando de lado las dificultades que se presentan con las estaciones. Cualquiera que sea la opción elegida, el diseñador de almanaques tiene que hallar procedimientos prácticos para manejar los pequeños errores acumulativos. De aquí la complicada casuística de años bisiestos, meses de duración variable y demás. Para darnos cuenta de lo muy complicado que puede llegar a ser, podemos consultar un ejemplar del *Calendrical Calculations* (Cambridge University Press, 1996) de Reingold, o visitar la página dedicada al libro en la Telaraña (http://emr.cs.uiuc.edu/home /reingold/calendar-book/index.htlm).

El sistema calendárico más sencillo consistiría en ir numerando los días consecutivos, una vez elegida una "época" o día de arranque conveniente. Los astrónomos utilizan



1. El calendario chino contiene un año solar dividido en 24 períodos

El *Rata Die*

La expresión $\lfloor x \rfloor$ significa "la parte entera del número x". En el calendario gregoriano, para hallar el valor R.D. del día D del mes M del año A se calcula:

(*a*) 365 (A – 1)

(*b*) $\lfloor(A-1)/4\rfloor - \lfloor(A-1)/100\rfloor + \lfloor(A-1)/400\rfloor$

(*c*) $\lfloor(367M-362)/12\rfloor$

(*d*) Si M ≤ A 2, se toma 0; si M > 2 y A es un año bisiesto se toma –1; en los demás casos se toma –2.

(*e*) D

y se suman todos estos números.

El concepto *a* representa el número de días no-bisiestos en años anteriores, mientras que *b* es el número de días bisiestos en años anteriores (uno cada cuatro años, que se omite cada 100 años, aunque se introduce uno cada 400). El concepto *c* es una astuta fórmula para hallar el número de días en los meses anteriores del año A, suponiendo que febrero tiene 30 días, lo que no es el caso; de aquí el término de corrección *d*. El número D del paso *e* representa, claro está, el número de días en el mes en curso, los únicos no contados hasta ahora.

el día juliano, pero Dershowitz y Reingold prefieren un invento propio: la "fecha fija" o *rata die*, que se abrevia R.D. De este modo, el día 1 del sistema R.D. es el 1 de enero del año 1 del calendario gregoriano, el calendario que utilizamos en la actualidad. La verdad es que en el gregoriano no existió realmente el año 1, pues tal calendario fue introducido en 1582 por el Papa Gregorio XIII; hay que extrapolar retrógradamente. El "primer" día fue un lunes, lo que nos permite tomar como día 0 el domingo anterior y numerar los días de la semana de 0 a 6. En *Calendrical Calculations* se utiliza el valor R.D. como sistema de referencia común.

A modo de ejercicios de calentamiento, he aquí dos problemas sencillos que sirven de ejemplo para el tipo de matemáticas necesarias:

1. ¿Qué día de la semana será el 1.000.000 R.D.?
2. ¿Cuántos años trópicos medios completos transcurrirán entre 0 y 1.000.000 R.D.?

Para responder a la primera pregunta, observemos que los días de la semana forman un ciclo repetitivo de longitud 7. Por tanto, cualquier R.D. que sea múltiplo de 7 tiene que ser domingo; cualquiera que deje resto 1 al dividirlo por 7 será lunes, y así en los demás casos. Tal hecho se expresa diciendo que el número de día es el número R.D. módulo 7. En general, *x* módulo 7 significa hallar el resto de la división por 7. Dado que 1.000.000 = 7 × 142.857 + 1, tal resto es igual a 1 cuando *x* = 1.000.000. Por tanto, 1.000.000 R.D. caerá en lunes.

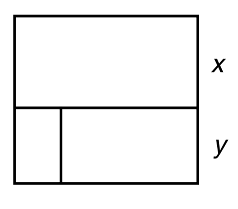
Para responder a la segunda, se divide 1.000.000 entre 365,242189 y se obtiene 2737,9093. Tal resultado nos dice que 1.000.000 R.D. tiene lugar 2737 años (trópicos medios) completos contados desde 0 R.D. El valor 2737 resulta de suprimir todos los decimales del cociente. Matemáticamente, esta operación la realiza la función "parte entera", $\lfloor x \rfloor$, que es el máximo entero menor o igual que *x*.

Veamos ahora de convertir una fecha gregoriana de la que tengamos memoria reciente, la de la última Navidad por ejemplo, a su valor R.D. Recordemos la regla de años bisiestos del Papa Gregorio XIII: los años que sean múltiplo de 4 tienen un día más, el 29 de febrero, a menos que sean múltiplos de 100 (aunque los múltiplos de 400 también son años bisiestos). Dershowitz y Reingold hacen ver que esta regla conduce a la receta del recuadro de lo alto. Entonces, siendo el mes M = 12, el día D = 25 y el año A = 1996, obtenemos (a) = 728.175, (b) = 498 – 19 + 4 = 483, (c) = 336, (d) = –1, y (e) = 25. El valor R.D. es 728.175 + 483 + 336 – 1 + 25 = 729.018. Por consiguiente, el día de la semana es 729.018 módulo 7 = 3. Así fue: el día de Navidad de 1996 cayó en miércoles.

Acuse de recibo

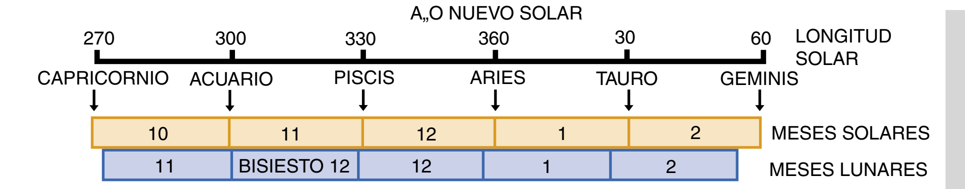
El artículo de agosto estuvo dedicado al "número plástico", al que Richard Padovan ha hecho popular, y a la sucesión asociada de "números de Perrin". Padovan señaló que el número plástico fue inventado en 1924 por un estudiante de arquitectura francés, Gérard Cordonnier, y en 1928, por un monje benedictino y arquitecto holandés llamado Hans van der Laan. Y añadía que, tal como yo presumía, su familia es, en efecto, originaria de la ciudad italiana de Padua.

Ervin Wilson, de Los Angeles, descubrió que la sucesión de Padovan (a la que tal vez deberíamos dar nuevo nombre) guarda estrecha relación con la escala *S'lendro* utilizada en la música de Java y Bali. Tanto esta escala como otra llamada *Pélog* se pueden deducir elegantemente de ciertas regularidades del triángulo de Tartaglia (o de Pascal); a su vez, tales regularidades están relacionadas con la sucesión de Padovan. John H. Bonnett, Jr., de Livingston, me envió un emporio de información, de la que ofrezco una muestra. Si dividimos un cuadrado en tres rectángulos semejantes (igual forma, distinto tamaño), como en la figura, la razón de los dos segmentos en que queda dividido el eje vertical es el número plástico.



El número plástico es la razón x/y

Jeffrey Shallit, de la Universidad de Waterloo, me hizo saber que en 1982 él había descubierto dos "pseudoprimos de Perrin," esto es, números compuestos *n* que dividen al número de Perrin A(*n*). Sus valores son $n = 271.441 = 521^2$ y $n = 904.631 = 7 \times 13 \times 9941$. (El primero de ellos fue publicado por William W. Adams y Daniel Shanks, también en 1982). El cálculo de Steven Arno mencionado por mí trata de una clase particular de pseudoprimos de Perrin, no de todos ellos. John P. Robertson, de Berwyn, añadió que no había encontrado ningún otro pseudoprimo de Perrin menor que 2.900.000. ¿Podrán los lectores hallar nuevos ejemplos? —*I. S.*



2. El antiguo calendario lunisolar hindú consta de meses solares y lunares corriendo a la par, lo que origina meses bisiestos

Para apreciar la complejidad de los cálculos que *Calendrical Calculations* maneja con soltura, tomemos el calendario persa moderno. Fue adoptado en 1925, pero su época es el 19 de marzo del 622 d. de C., esto es, el equinoccio vernal inmediatamente anterior a la época del calendario islámico. Consta de 12 meses; los seis primeros tienen 31 días; los cinco siguientes son de 30 días, y el último, llamado *Esfand*, tiene 29 días en años ordinarios y 30 en los bisiestos. La regla para la determinación de años bisiestos es sumamente intrincada. Sigue un ciclo de 2820 años, de los que 683 son años bisiestos.

Los 2820 años están divididos en 21 subciclos de 128 años, seguidos por un subciclo de 132. Cada uno de los 128 subciclos está dividido en sub-subciclos de duraciones 29 + 33 + + 33 + 33, mientras que el subciclo de 132 se divide en 29 + 33 + 33 + 37. Finalmente, en cada sub-subciclo, los años 5, 9, 13 y sucesivos, contados de cuatro en cuatro, son años bisiestos. El calendario persa comete un error de 1,7 minutos al concluir un ciclo de 2820 años, por lo que serían necesarios 2,39 millones de años para saltarse un día con respecto a los ciclos astronómicos verdaderos.

El antiguo calendario lunisolar hindú obedece a una regla muy diferente. La estructura global se vale de un ciclo de duración 1.577.917.500 días. El “año” (o estrictamente hablando, el año sidéreo llamado *arya*) es 1/4.320.000 de ese número, o sea, 365,258 días. Cada mes solar corresponde a 1/12 del año. Cada mes lunar es una 1/53.433.336 parte del ciclo de 1.577.917.500 días, y equivale a 29,531 días. La idea fundamental consiste en hacer funcionar simultáneamente ambos meses. De cuando en vez, un mes lunar queda completamente contenido en un mes solar; en tal caso, ese mes lunar se considera mes bisiesto; tras él se inserta un mes lunar supernumerario.

A diferencia de otros almanaques, el chino se basa en efemérides astronómicas, no en reglas aritméticas. La versión llevada a la práctica en *Calendrical Calculations* es la más reciente, que data de 1645. Los meses son lunares, comienzan en la luna nueva, y los años contienen 12 o 13 meses. Sin embargo, la disposición de los meses depende del paso del sol por los signos del zodíaco. El año solar está dividido en 12 períodos mayores, llamados *zhongqi*, y en doce períodos menores, llamados *jieqi*. Cada tramo corresponde a un segmento de 15 grados de longitud solar, empezando los mayores en los múltiplos de 30 grados y los menores, en los hiatos entre ellos.

La regla básica es que el solsticio de invierno siempre ha de ocurrir durante el mes décimoprimero del año. Por consiguiente, en un año que solamente contenga 12 meses lunares completos, los meses están siempre numerados 12, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. Sin embargo, en un año que contenga 13 meses, uno de los números está duplicado en un mes bisiesto, a saber, el primer mes que no contenga un período solar mayor. (Dado que hay 13 meses lunares y tan sólo 12 períodos solares mayores, al menos uno de los meses lunares ha de dejar de contener un período solar mayor.)

Si tan complejos son los calendarios de hoy, ¿cómo serán los del futuro? La duración de todos los diversos ciclos astronómicos está variando lentamente a causa de las fuerzas gravitatorias de las mareas. Hay que contar además con la precesión de los equinoccios, que sufre deslizamientos ocasionales relacionados con las edades de hielo, por lo que un calendario futuro habrá de estar ligado al clima.

El calendario tiene que ser interactivo, acorde con lo que está sucediendo y no meramente basado en reglas preestablecidas, porque los astrónomos han descubierto que el movimiento del sistema solar es caótico. Puede que el día de Año Nuevo de 10.000.000 d. de C. siga siendo todavía el primero de enero, pero nadie puede predecir a cuántos días se encuentra del día de hoy.

Libros

Esteban Rodríguez Ocaña, Sergi Sabater y Luis Alonso

Medicina

Historia

VIDA Y HECHOS DEL LICENCIADO MARTÍN DE CASTELLANOS (¿1545-1614). PRIMER CATEDRÁTICO DE UROLOGÍA EN LA HISTORIA DE LA MEDICINA, por Emilio Maganto Pavón. Oviedo, Real Academia de Medicina del distrito universitario de Asturias y León, 1994.

HISTORIA DE LA DERMATOLOGÍA, por Xavier Sierra Valentí. MRA, Creación y Realización Editorial S. L., Barcelona, 1994.

Henos aquí ante dos producciones dispares, que sólo el azar ha podido reunir en una misma recensión bibliográfica. Una, la ovetense, es una monografía de investigación, en la que se ofrece una documentada aproximación a la vida y desempeño quirúrgico de uno de los afamados empíricos que ejercieron en la Corte de las Españas, a caballo entre los siglos XVI y XVII. La segunda es un relato actualizado, siguiendo una perspectiva muy tradicional, de la evolución de los conocimientos y técnicas de trabajo en la especialidad médico-quirúrgica que figura en su título. Sólo se parecen por su origen, ya que ambas son obra de especialistas de las respectivas materias que historian.

La aportación original de la obra de Emilio Maganto consiste en el manejo de un número importante de fuentes manuscritas, obtenidas por el autor de las colecciones del Archivo Histórico de Protocolos y del Parroquial de la Iglesia de la Santa Cruz, ambos de Madrid, principalmente. Dichas noticias, de contenido civil (partidas de matrimonio y de bautismo, escrituras de venta, testamentos, etc.) se relacionan con otras referentes a la actividad profesional del biografiado, obtenidas en más fuentes de la época, como las Actas de Cortes de Castilla, o bien en trabajos historiográficos recientes, como los de Muñoz Garrido o Juan Riera. A su vez, todo ello se encuadra en el contexto socioprofesional de la cirugía y la "urología" de la época.

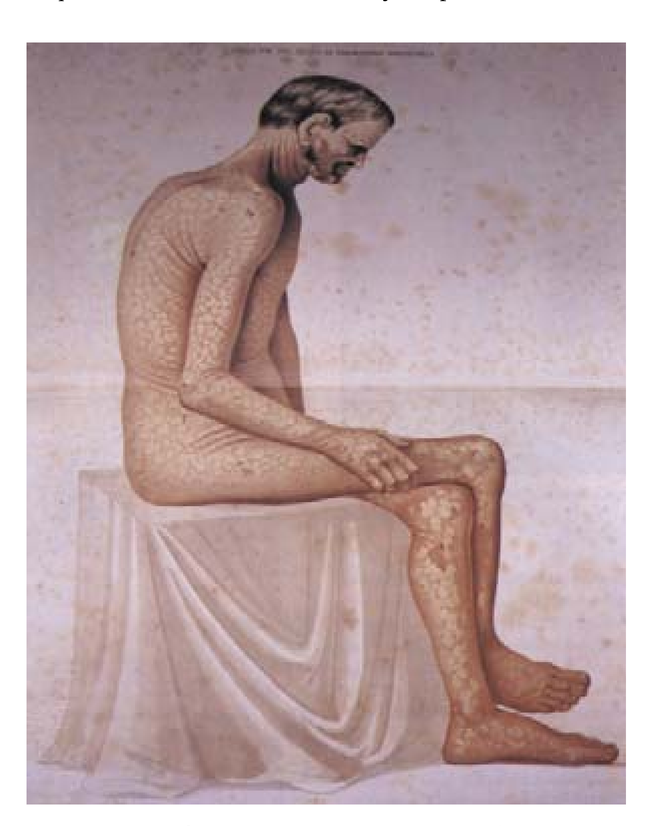
El resultado es una monografía densa e interesante, que mejora el conocimiento histórico de esta personalidad (por ejemplo, su fecha de aprobación, o licenciatura, real) y, sobre todo, amplía o refuerza el marco social del desarrollo de la cirugía española bajo el reinado de la Casa de Austria. Más discutible resulta, desde mi punto de vista, el empeño en mantener la vigencia de un acercamiento que podíamos denominar "genealógico", pretendiendo relacionar dicha práctica con la actual especialidad urológica. No parece que haya ningún otro punto de semejanza entre personas de formación artesanal y empírica (el testamento de Martín de Castellanos no refleja la existencia de libro alguno en su poder) y la actual profesión quirúrgica, de obligada socialización universitaria y hospitalaria, salvo el cuidarse de ciertos problemas de salud de una misma localización anatómica, a los que en el siglo XVI y XVII se sumaban, en ocasiones, lesiones traumatológicas (caso de los urólogos y algebristas).

El libro está compuesto con un detalle minucioso, que tal vez resulta un tanto complicado por la disposición de las notas (al margen) y las abundantes ilustraciones, estas últimas no siempre paralelas al texto, de modo que da la impresión de haber primado más la voluntad de *adornar*.

Por lo que respecta al texto de Sierra, ofrece lo que sugiere. Su autor, médico dermatólogo de profesión, con una presencia ya establecida en el campo de la historia de su disciplina a través de una decena de trabajos publicados en revistas de la especialidad entre 1983 y 1994, aborda una exposición de conjunto de la misma.

Para ello realiza un ordenamiento cronológico, según el canon occidental, desde la prehistoria al siglo XX. Con el devenir de conocimientos y técnicas se mezcla una aproximación a la historia de las enfermedades de transmisión sexual. El sustrato de presentación de los avatares de la disciplina es el seguimiento de la obra de los grandes nombres. A partir de la Ilustración aparecen también apartados temáticos hasta la presentación de la terapéutica del siglo XX. Como quiera que su base bibliográfica es amplia, con una atención a lo más reciente publicado sobre esta materia en las revistas de la especialidad, en especial las interesantes y numerosos aportaciones de G. Tilles y K. Holubar, resulta, más que una aportación original, una puesta al día en lengua castellana.

No hay novedades de enfoque ni de contenido en este texto que puedan sorprender a los seguidores de la historia de la dermatología. Tampoco hay ningún acercamiento original a los problemas que suscita el introducir los problemas específicamente dermatológicos dentro de los esquemas habituales para la historia de la patología. (E. R. O.)



Psoriasis herpético subagudo. *(Atlas de clínica iconográfica de enfermedades de la piel o dermatosis, de E. Olavide.)*

Los ríos

Y sus leyes

A view of the river, por Luna B. Leopold. Harvard University Press; Cambridge, 1994.

Las leyes físicas que determinan la forma y el dinamismo del río no ofrecen un único resultado, sino una pléyade de posibles con una notable influencia del azar. La tendencia que siguen, en concordancia con las diferentes fases de precipitaciones, es siempre hacia la forma más probable, es decir, la que encierra una menor varianza de todas las posibles. Esta idea general subyace en los diferentes aspectos de geomorfología fluvial que Leopold va desgranando. Para alguien que, como el que suscribe, contempla el río desde el punto de vista de la ecología, esta aproximación es familiar. Hacia los años ochenta los ecólogos norteamericanos crearon una visión holista (o sistémica) del río, que consagró la tesis funcional del trasiego de materia y energía, así como el anclaje en ellas de las comunidades biológicas, y se estableció que su dinámica requiere la consideración del gradiente de factores físicos de la cuenca de drenaje. Tal visión del río como ecosistema estaba inspirada en los primeros trabajos de L. B. Leopold y sus colaboradores, en los que ya se sugería la imagen de río como sistema abierto con tendencia al equilibrio.

El libro alterna la descripción de conceptos hidrológicos y geomorfológicos con la visión personal de Leopold en diferentes aspectos de la dinámica fluvial. Así, en los primeros capítulos se efectúa una breve descripción de los términos geomorfológicos más comunes, las metodologías habituales en hidrología y conceptos importantes en geomofología. Más adelante se analizan distintos aspectos de la relación entre la descarga y la dinámica fuvial.

De los distintos aspectos detallados, algunos captan la atención por la originalidad de su planteamiento. Los meandros puede ser descritos como un compromiso entre el mínimo trabajo a desarrollar y la distribución uniforme de este trabajo. El resultado de tal compromiso es la minimización de la varianza, a la que los meandros se aproximan en una especie de sistema estacionario. Por ello la mayoría de los ríos crean meandros. La forma geométrica resultante, en curva sinusoidal, surge igualmente de un cable de acero cuando está sometido a tensión. Se trata del resultado de someter a tensión sistemas abiertos que se aproximan a un estado estacionario. Uno se pregunta, al reflexionar sobre ello, cuál es el sentido de determinadas gestiones ambientales que se obstinan en contradecir la propia física del río, empeñados en eliminar meandros y en canalizar el curso en tránsitos lineales. También el compromiso entre distintas tendencias puede observarse en el perfil longitudinal del río, intermedio entre la línea recta y la máxima concavidad. Mientras que la primera sería una respuesta a la tasa uniforme de gasto energético, la segunda respondería a una tendencia al mínimo trabajo. En los ríos la situación intermedia es la que se impone.

El efecto del azar se manifiesta al analizar la relación entre los caudales que transportan los ríos y sus dimensiones (área de drenaje, anchura). La relación casi lineal entre el área de drenaje y el caudal encierra, al comparar distintos ríos, un componente probabilístico. La existencia de montañas, por ejemplo, puede generar una elevada variabilidad en una cuenca. Ríos adyacentes pueden competir unos con otros en función de la distribución de sus pendientes.

También tiene un importante componente estocástico la formación de la red de drenaje. La formación de nuevos afluentes surge del compromiso entre la tendencia al mínimo trabajo y la máxima entropía (es decir, la máxima probabilidad). Es, en este sentido, esclarecedora la analogía que Leopold efectúa entre la red de drenaje y la formación de estructuras mediante paseos al azar. La similitud entre la red de drenaje simulada y la real permite afirmarse en la importancia del azar en la configuración de las redes de drenaje.

Las características del canal fluvial se ajustan a los cambios en la descarga hidráulica y carga de materiales transportados. Profundidad, velocidad, anchura y tipo de substrato responden a los cambios de modo sincrónico. El modo en que se ajustan es sorprendentemente parecido entre ríos de distintas dimensiones y bajo condiciones climáticas diferentes. Leopold se afirma en la existencia de un principio físico de una gran generalidad: todos los ajustes están relacionados con la conservación y la distribución de la energía que se consume o se conserva. Perdura el estado más probable. (S. S.)

Revolución científica

Complementarios y marginales

Physiologia. Natural philosophy in late aristotelian and cartesian thought, por Dennis Des Chene. Cornell University Press; Itaca, 1996.
Tra scienza e immaginazione. Le matematiche presso il collegio gesuitico napoletano (1552-1670 ca.), por Romano Gatto. Leo S. Olschki; Florencia, 1994. **Franco Burgersdijk (1590-1635)**. Dirigido por E. P. Bos y H. A. Krop. Rodopi; Amsterdam, 1993.

Die Gerätschaft der chymischen Kunst. Der Traktat “De sceuastica artis” des Andreas Libavius von 1606. Traducción y comentarios de Bettina Meitzner. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1995. **The microscope in the Dutch republic. The shaping of discovery**, por Edward G. Ruestow. Cambridge University Press; Cambridge, 1996. **Astrology and the seventeenth century mind**, por Ann Geneva. Manchester University Press; 1995.

Science and society. Historical essays on the relations of science, technology and medicine, por A. Rupert Hall. Variorum; Aldershot, 1994. **Science and the shape of ortodoxy. Intellectual change in late seventeenth-century Britain**, por Michael Hunter. The Boydell Press; Woodbridge, 1995.

Nos hemos acostumbrado a partir el siglo XVII, el de la revolución científica, en dos mitades que girarían en torno a las figuras señeras de Galileo, en la primera, y Newton, en la segunda. Pero la investigación histórica está sacando a la palestra perspectivas nuevas y alumbrando aspectos obscuros de esa centuria que merecen hacerse públicos más allá de los círculos especializados.

A veces la novedad consiste lisa y llanamente en desenmascarar el prejuicio. Ha tenido que venir un estudioso norteamericano para revelarnos cuán modernos eran los filósofos españoles de las postrimerías del XVI y principios del XVII. Esa es la tesis de *Physiologia. Natural Philosophy in Late Aristotelian and Cartesian Thought*, un recorrido exhaustivo por las obras de Arriaga, Suárez, Toledo, los Conimbricenses y

demás aristotélicos. Haciendo abstracción de tópicos que todavía resuenan en nuestras aulas, Dennis Des Chene se ha ceñido a la lectura inteligente de unas obras que fueron familiares a Descartes y a sus contemporáneos. Como en una labor arqueológica, Des Chene desentierra el sustrato en que aparece la ciencia moderna.

La física de Aristóteles se centra en lo que él llama "principios de la naturaleza", a saber, materia y forma, las cuatro causas, el cambio y el movimiento. Son los conceptos que glosan los *comentarios* (Toledo y los Conimbricenses) y sistematizan los *cursos* (Suárez, Eustaquio y Juan de Santo Tomás), donde se introducen los supuestos de la nueva ciencia. (No ha sido ahí donde hundieron el rejo los historiadores, sino en los puntos de concordancia aparente con el hacer de la física, esto es, sobre la teoría de la inercia o las reglas cuantitativas de los calculadores de Oxford.) Descartes se propuso substituir *a radice* filosofía natural aristotélica por otra propia, y ello le importó más que la idea de método o la geometrización de la naturaleza.

El aristotelismo daba por supuesta la existencia de un orden natural. Los fenómenos que estudiaba eran regularidades de la vida diaria: el fuego calienta, los animales se reproducen de acuerdo con su especie, el exceso daña a los sentidos. Competía a la filosofía natural entender ese orden, cuyo secreto último yacía en el tránsito de lo que estaba en potencia a su realización. De la ejecución de ese salto, o tendencia para ser más exactos, se ocupaban las así denominadas potencias activas. Las unificaba y confería significado la forma substancial.

Pocas nociones aristotélicas provocan mayor rechazo que la de forma substancial. Descartes escribe en *Le Monde* que los cuerpos inanimados pueden explicarse sin necesidad de admitir otra cosa que no sea movimiento, cantidad, figura y disposición de las partes materiales. La idea de mecanismo vino a sustituir la de forma. Para Descartes, la forma es la figura; para Robert Boyle, una modificación esencial de la materia. Des Chenne ve en esas posturas un resabio del desarrollo aristotélico de la idea de figura. La noción de materia prima se convirtió también en blanco de irrisión. Se la conjuraba cual fantasma incoherente, incognoscible y superfluo. Más valía concederle a la materia el atributo de la extensión (Descartes) o reducir el sustrato de todo cambio a substancias individuales inmutables (atomistas). Des Chenne señala el ámbito de la categoría aristotélica de cantidad en que se mueven esas posturas antagónicas.

La cantidad, la matemática, constituía el yunque de acrisolación de la nueva ciencia. Los jesuitas, autores mayoritarios, aunque no exclusivos, de comentarios y cursos, le prestaron particular atención. Lo detalla Romano Gatto en *Tra scienza e immaginazione. Le matematiche presso il Collegio Gesuitico Napoletano* (1552-1670). Sin esa institución no podemos comprender el brote cartesiano que emergió con especial fuerza en el virreinato español.

El colegio napolitano se abrió a la matemática en 1568, cuando Jerónimo Hurtado presentó a discusión pública 200 tesis. Había, entre éstas, 10 *Conclusiones mathematicae*. Predominaban las de carácter epistemológico, lo que entonces se conocía por certeza de la matemática y que venía a ser en última instancia la cuestión fundamental de su naturaleza autónoma. Lo innovador estribaba en conceder a las demostraciones matemáticas coherencia interna, al margen de las cuatro causas en que se fundaba el saber aristotélico.

Aunque la llegada de Clavius a Nápoles fue decisiva, el desarrollo de la matemática se cimentó con la prolongada docencia de Giovanni Giacomo Staserio, protegido y estrecho colaborador de aquél, con quien discute sobre el movimiento de la Tierra y caída de los graves. Los dos se propusieron llevar a cabo las normas de la *Ratio studiorum* de 1586 en materia científica. Staserio nos ha legado *De centro gravi et linea directionis*, un extracto del *In apparatu Urbis ac Templi Hierosolomytani*, texto de exégesis bíblica de nuestro Juan Bautista Villalpando. El manuscrito retomaba uno de los resultados más importantes de la estática de los sólidos. Partiendo de la investigación del baricentro y definiendo la *linea directionis* como la línea a lo largo de la cual acontece la caída de los graves, el autor enunciaba la regla del polígono de sustentación, según la cual un cuerpo apoyado permanece en equilibrio hasta que la *linea directionis* cae hacia el interior de la superficie que lo contiene.

Copérnico gozó de aprecio en el colegio napolitano. Por múltiples razones, no siendo la menor que el *De revolutionibus* permitía entender el sistema ptolemaico. Se aceptaba su heliocentrismo como hipótesis matemática. Sabemos que se acogió con entusiasmo el descubrimiento galileano de los planetas de Júpiter. Con la aparición del *Nuncius* la cuestión de la esfericidad de la Luna conmovió el centro jesuítico. ¿Cómo conciliar la supuesta esfericidad geométrica planetaria con las innegables irregularidades observadas por el telescopio?

La verdad es que fenómenos como la aparición de las novas o el paso de los cometas habían dilatado las dimensiones del universo aristotélico y roto la inmutabilidad del cielo de las estrellas fijas. Era preciso adelantarse. Staserio creó con ese propósito un laboratorio de matemática y de astronomía y enseñó el álgebra de Viète.

El primero de octubre de 1625, los Estados de Holanda y Territorios Libres emitieron una orden por la que se regulaba la enseñanza bajo su jurisdicción. Venía a ser la respuesta protestante a la *Ratio studiorum* de 1586 jesuítica. A esa conclusión se llega tras leer las diversas colaboraciones que integran el volumen *Franco Burgersdijk. (1590-1635). Neo-Aristotelianism in Leiden*. Representa este filósofo el pensamiento oficial del feudo holandés de la Reforma.

La orden dictada ponía de manifiesto la necesidad de unificar los textos. Así nació el dedicado a la lógica y publicado por Burgersdijk en 1626: *Institutionum logicarum libri duo*. En las cátedras aristotélicas de lógica los alumnos seguían aprendiendo las teorías sobre propiedades de los términos y las expresiones sincategoremáticas ("no", "algunos", "todos", etc.), la lógica modal y la lógica epistémica. Los humanistas, sin embargo, habían diluido la lógica en la dialéctica, disciplina sistematizada por Rudolph Agricola en *De inventione dialectica*, que apareció en 1515. Influido por Cicerón, Quintiliano, Boecio y Valla, Agricola concebía la lógica como *ars docendi*. Pero el texto que alcanzó mayor popularidad fue la *Dialéctica* de Pierre Ramus. Este manual, conciso y didáctico, prestaba suficiente atención a la invención, el juicio y el método.

Hubo esfuerzos sincréticos que se esforzaban por conjugar lógica aristotélica con dialéctica. Representan esa vía los *Dialectices libri IIII*, de Philip Melanchton, para quien el método, cuestión entonces disputada, era la recta manera de enseñar. Jacopo Zabarella, aristotélico de Padua, se opuso a que el método científico coincidiera con el método de enseñanza. En su opinión, el único objetivo del método es la adquisición del conocimiento. Método, o silogismo demostrativo, es el camino de lo conocido a lo desconocido. Y puesto que en un silogismo demostrativo uno razona de la causa al efecto o del efecto a la



Retrato de Elias Ashmole, pintado por Cornelius de Neve en 1664

causa, hay exactamente dos métodos: el compositivo y el resolutivo. Cuando uno conoce los principios de una ciencia, como en la matemática, basta el método compositivo. Pero en los casos en que carecemos de conocimiento de los principios pertinentes, como en medicina o física, hemos de proceder a través del método resolutivo.

La lógica de las *Institutiones* de Burgersdijk es aristotélica con influencias de Agricola y Ramus. No olvida, pues, la invención, aunque atienda de preferencia a la naturaleza y división de la lógica, en el libro primero, y a los instrumentos (definición, división, argumentación y silogismo) en el segundo. Por su lado, la *Idea philosophiae naturalis* y el subsiguiente *Collegium Physicum*, donde Burgersdijk explica la física oficial protestante, depende en cuantía no insignificante de los comentarios de los Conimbricenses.

Entrados en el cultivo directo de la ciencia y la técnica, se advierten nuevos rumbos en tres campos sustantivos, el de la química, la microscopía y la astrología. Han abierto surco Bettina Meitzner con *Die Gerätschaft der chymischen Kunst*, Edward G. Ruestow con *The Microscope in the Dutch Republic* y Ann Geneva con *Astrology and the Seventeenth Century Mind*. Meitzner defendió en 1994 su tesis doctoral sobre el tratado *De sceuastica artis* de Andreas Libavius, médico y alquimista alemán que vivió a caballo entre el siglo XVI y el XVII. A este iatroquímico, firme defensor de la transmutación de los metales en oro, se le atribuye el descubrimiento de métodos para la preparación del sulfato amónico, sulfuro de antimonio, ácido clorhídrico y tetracloruro de estaño.

Los estudios de la química del XVI nos descubren la coexistencia de tres líneas principales de inquisición e interpretación. Hubo una fuerte corriente de química aplicada a la metalurgia, arte más que ciencia vinculada estrechamente a la renacida explotación minera del continente. Más pretenciosa era la línea teórica, inaugurada por Paracelso, que reducía todo a sal, azufre y mercurio, los principios fundamentales, base asimismo de su estrategia terapéutica. Por último, las ensoñaciones alquímicas en busca de la piedra filosofal.

Libavius recoge y depura esa triple trayectoria. En 1597 aparece la primera edición de su *Alchemia*, crecida en la más famosa segunda, de 1606, que sirvió de modelo para los textos de química franceses del XVII en los que se formaron los médicos y farmacéuticos españoles, algunos de los cuales manejaban directamente el texto del germano. Meitzner se ha centrado en la primera parte del libro primero de los comentarios a la *Alchemia*, el tratado de *Sceuastica artis*. Acomete allí Libavius la praxis química de su tiempo y la naturaleza teórica de la ciencia, arte llamada entonces de varios modos: segregatoria, separatoria y destilatoria. Calificativos que dicen relación directa con los dos procesos químicos admitidos, el de la resolución y el de la separación.

Diversas eran las acciones que ejercía el químico con los elementos que manipulaba (por usar sus términos: ablandar, cocer, asar, calcinar, fundir, destruir, construir, limpiar, etc.) en unos hornos cuya disposición constituye el núcleo de la obra. Meitzner anota las fuentes (la *Summa perfectionis* de Geber, por ejemplo), la recepción de la primera edición (críticas de Joseph Michel, quien llama ignaro en química a Libavius) y otras obligaciones al uso en cualquier edición crítica. Se esfuerza, además, en desentrañar el contenido real de lo expuesto por el autor.

Al hacer hincapié en la obra de Jan Swammerdam y Antoni van Leeuwenhoek, Ruestow diseca en *The Microscope in the Dutch Republic* las circunstancias sociales y culturales que conformaron las primeras fases del descubrimiento de lo microscópico. Analiza también el modo distinto en que Swammerdam y Leeuwenhoek interpretaron los objetos observados de acuerdo con su dispar preparación intelectual. Pone en debido contexto los debates sobre la generación y busca, por fin, una explicación del declive del microscopio en el siglo XVIII y su resurgimiento en el XIX.

Los padres de la nueva mecánica hallaron verdades escondidas en el reino desmaterializado de la matemática, mientras los anatomistas apresuraban su paso hacia el teatro de disección para contemplar estructuras insospechadas. Con todo, el telescopio y el microscopio emergieron como los nuevos símbolos del descubrimiento científico. Ambos instrumentos producían sus nuevas visiones por medio del aumento dióptrico, es decir, por alargamiento refractivo del ángulo visual bajo el que se escrutaban los objetos.

Gracias al telescopio Galileo había divisado montañas y cráteres en la Luna, satélites en órbita alrededor de Júpiter y estrellas que jalonan la Vía Láctea. Galileo justificó las fases de Venus y dio razón de las imágenes variables de Saturno, las que Christiaan Huygens terminaría por atribuir, en 1656, a los anillos de Saturno. Sin embargo, los observadores se movían dentro de un mundo familiar. Los montes y valles lunares eran réplica de los terrestres; igual que la Luna, también Venus tenía fases, y los satélites de Júpiter no hacían más que extender el de la Tierra.

No podía decirse lo mismo del microscopio, que ofrecía un mundo inédito. Sin parámetros de referencia.

Henry Power propuso en 1661 que los mínimos cuerpos que el ojo humano puede percibir era media proporcional entre los cuerpos mayores y los menores de la naturaleza, hallándose ambos extremos fuera del alcance de nuestra visión. Desarrollado a partir del telescopio, el microscopio compuesto comenzó a emplear una lente convexa y otra cóncava.

Mayor partido pudo sacársele cuando se optó por usar dos lentes convexas, lo que aportaba un campo mayor de visión. Los fabricantes experimentaron, a lo largo de los años centrales del siglo, con la incorporación de lentes adicionales, pero apenas se avanzó. Robert Hooke, cuya *Micrographia* de 1665 fue la primera de la bibliografía clásica sobre el particular, volvía del juego de tres lentes al de las dos lentes tradicionales cuando deseaba examinar con mayor finura las partes sutiles de un objeto. El microscopio simple, de una sola lente, existía ya en los años treinta. A él alude Descartes. Leeuwenhoek, que los construyó por cientos, llevó al límite su perfección. Constaban de una lente pequeña, empotrada entre dos placas finas de latón, plata u oro, en el centro de una de cuales se fijaba un juego de tornillos y punta metálica.

No resultaba fácil salvar escollos notables. Como el de la imperfección del propio cristal, lastrado con burbujas, manchas y estrías. Las imágenes aparecían desfiguradas. Una superficie esférica, al no enfocar con precisión, ofrece una imagen irregular y distorsionada hacia la perferia. Además, dispersa los colores que componen la luz blanca y produce rebordes cromáticos en la imagen.

Pero las limitaciones técnicas eran nimias comparadas con las maravillas que aparecían. El "polvillo" del queso era en realidad un cúmulo de animalillos; "se descubrió" todo un enjambre de gusanillos en los posos de vinagre. En sus *Observationum microcospicarum centuria*, de 1656, Pierre Borel reconocía la utilidad del instrumento no sólo para el estudio de las enfermedades (creíase que los gusanos provocaban las fiebres), sino también para el estudio de la generación de insectos, mundo mimado de los microscopistas. De los mínimos ácaros podían observarse su sistema nervioso y ojos. Fontana vio que la araña tenía seis "ojos", ocho hallaría más tarde Borel. En la metamorfosis de los insectos puso luz Johannes Godaert, tras treinta años de intensa investigación. Swammerdamm, al disecar abejas, halló en lo que desde siglos se suponía "rey" una masa de huevos. Era, pues, la reina. De Graaf mostró que los testículos no estaban compuestos, como se venía creyendo, de una substancia esponjosa, pulposa o "glandulosa", sino que era un amasijo de vasos diminutos.

Tales hallazgos no quedaron en mera anécdota. Se conmovieron, para unos, los cimientos de la filosofía natural, en tanto que para otros se reforzaron. Boyle y Gassendi aducían las imágenes del microscopio en defensa del atomismo: los órganos finísimos de los insectos que la lente ponía de manifiesto sólo podían funcionar si estaban compuestos de partes todavía menores.

En *Astrology and the Seventeenth Century Mind*, Geneva presenta un cuadro radicalmente nuevo del arte a comienzos de la edad moderna. A través de William Lilly, a quien está consagrada la obra, reconstruye los procesos de encriptación y las categorías diagnósticas de cometas, eclipses, soles fantasma y conjunciones de Júpiter y Saturno. La función de la astrología adquiere aquí un lenguaje propio y se eleva al rango de sistema de explicación universal.

La astrología preocupaba a las mentes más poderosas del siglo XVII. A finales de esa centuria sufrió, sin embargo, una metamorfosis. Contra la tesis oficial, sostiene la autora que la astrología no murió porque surgiera una nueva mentalidad científica, sino que cambió su proceder sin perder fuerza. Una fuerza que, para entenderla, hemos de adentrarnos en su lenguaje simbólico que opera dentro de un marco neoplatónico.

En efecto, quienes achacan la disolución de la astrología al desarrollo de la astronomía recuerdan que el maridaje confuso arranca del primer tratamiento sistemático de ambas en el siglo II de nuestra era. Pero la obra en cuestión, el *Tetrabiblos* de Ptolomeo, las distingue y considera a menudo incompatibles. Para Ptolomeo, la astrología es una predicción a través de la astronomía. Lo que no significa que entonces, ni en la Inglaterra del siglo XVII, la astrología careciera de respetabilidad intelectual, al menos en algunos de sus apartados. No era una ciencia, ni una religión, ni magia. Ni astronomía, ni matemática, ni meteorología o alquimia o brujería. La astrología veía en ellas puras herramientas de su quehacer. Compartió principios con algunas. Pero su análisis final era propio: un arte adivinatorio y pronóstico.

Vinculada con la astrología se encontraba la tendencia al lenguaje críptico y codificado. A finales del XVI era común utilizar números para representar letras. Tres números podían simbolizar una sílaba, un nombre común o un nombre propio. En 1641 John Wilkins publicó *Mercury: or the Secret and Swift Messenger*, en el que daba a conocer la invención de caracteres, dobles alfabetos, jeroglíficos, emblemas y taquigrafías. Se popularizó el anagrama. El propio Newton creó su pseudónimo alquímico a partir de su nombre latinizado, Isaacus Newtonus: *Jeova sanctus unus*.

Para adquirir una perspectiva general de la segunda mitad del XVII en Inglaterra podemos acudir a dos libros, ambos gavillas de artículos, de expertos de larga trayectoria. Uno aporta, a la vieja usanza, amplias panorámicas (*Science and Society. Historical Essays on the Relations of Science, Technology and Medicine*, de A. Rupert Hall) y el otro se ciñe más a los protagonistas y entidades (*Science and the Shape of Ortodoxy.*


The same with the Deciphering interlined.

Carta cifrada escrita por el rey Carlos I

Intellectual Change in Late Seventeenth-Century Britain, de Michael Hunter).

Los quince artículos que componen la selección de Hall resumen la investigación de medio siglo, con especial énfasis en la historia de la técnica y en la historia de la medicina. Recupera un luminoso artículo sobre la masa crítica de la Revolución, donde distingue tres grupos de *profesionales*: profesores universitarios, enseñantes de matemáticas, anatomía y medicina, docentes de esas materias fuera de los recintos universitarios; sus diversos ejecutores (médicos, inspectores, marinos, ingenieros, etc.); y fabricantes de instrumentos, ópticos, farmacéuticos, cirujanos y comerciantes.

La universidad del siglo XVII andaba muy escasa de ciencia observacional y experimental. De los avances que estaban produciéndose en física, astronomía, botánica, zoología y química, no se les daba cuenta a los alumnos. El futuro investigador debía aprender las técnicas en el ejercicio empírico, los libros y el contacto personal con el científico avezado, a menudo fuera de su ciudad o país. Era evidente la resistencia de los estamentos universitarios a las innovaciones que suponían Vesalio, Copérnico o Galileo.

Decodificación del texto anterior por Wallis

Por su parte, los artesanos planteaban problemas incitantes que valía la pena analizar. Acumulaban habilidad y conocimientos que ponían al servicio de la ciencia. Sea el caso de la artillería, una de las especialidades de Hall. Procedía del Renacimiento una intensa dedicación a la *pirotechnia*, que suponía, entre otras bases, dominio de la trigonometría. Aunque no podemos imaginarnos a todos los artificieros con un manual de triangulación, cautela que debe predicarse a propósito de las armas cortas. No es, sin embargo casual que en ese contexto se estudiara el movimiento de los proyectiles en el aire. La Regia Sociedad, en su interés por la balística, mandó hacer experimentos sobre la fuerza de retroceso de las armas de fuego, la pólvora negra y los fulminantes.

Las *Transactions* abrieron sus páginas a la fisiología y otras ramas de la medicina. Muchos académicos eran, con Thomas Willis al frente, fervientes partidarios de la iatroquímica. Se aplicaron al estudio de la respiración, lo que representaba un avance respecto al descubrimiento de la circulación por Harvey. Se comprobó la vinculación del movimiento de la sangre y la inspiración del aire, en cuyo marco recibía explicación coherente el movimiento de los pulmones. El problema de la sangre llevó a la experimentación con animales, la llamada cirugía infusoria, con transfusiones incluidas de sangre de un animal a otro. Malpighi había descrito los "átomos" o corpúsculos rojos de la sangre en *De polypo cordis*, un trabajo que apareció también en las *Transactions*. El descubrimiento de tales corpúsculos avivó la investigación microscópica, cuyo entusiasmo se incrementó con la llegada de los trabajos de Leevenhoek. La ciencia se internacionalizaba.

Hunter compila una galería de retratos, que nos hablan de su participación en la transformación del saber y la sociedad. En primer plano, John Evelyn, Christopher Wren, Elias Ashmole y John Flamstead. Detrás, John Wagstaffe o Thomas Aikenhead. Ahonda también en la oposición a la ciencia y en las tradiciones intelectuales alternativas con las que coexistió. Algunos ensayos son de carácter general, aunque con el aval de análisis pormenorizados y publicados aquí o en otro lugar (en torno a John Aubrey, Samuel Jeake, William Stukeley y Robert Boyle).

Empieza con un estudio sobre Elias Ashmole, fundador del museo oxoniense que lleva su nombre, artículo éste que permite entender mejor el libro reseñado de Geneva. Apasionado por la astrología, alquimia, la magia y el coleccionismo, aficiones que respondían a una visión arcana del mundo, fue uno de los promotores de la nueva ciencia racionalista y mecanicista.

Menos contradictorio es Christopher Wren, cuyos intereses se dirigen hacia la cartografía astronómica, microscopía, fisiología y fenómenos meteorológicos. Buscaba la claridad a través de la matemática, cuya expresión cristalizó en su extensa obra arquitectónica. La astronomía de Wren, en la que influyó Johann Kepler, progresó de la simple observación a la teoría en el problema planteado por el planeta Saturno, del que dijo estar rodeado por una corona. Antes que Hooke, empezó a ilustrar criaturas minúsculas observadas en el microscopio.

Si los años cincuenta del XVII resultaron decisivos para la formación de esa generación, la inauguración de la Regia Sociedad en 1660 marcó el rumbo de la madurez que supuso la institucionalización de la nueva ciencia. Los fundadores de la academia procedieron a través de un proceso de ensayo y error; unas iniciativas demostraron ser más afortunadas que otras. Poco a poco va penetrando en la sociedad el valor útil de la ciencia, gracias a la proliferación de escritos que divulgan sus avances.

Como en cualquier época de cambio, la ciencia de la Restauración ha de hacer frente a las pretensiones de otras tradiciones intelectuales. El astrónomo real John Flamsteed combate la astrología, a la que reputaba incompatible con los criterios de verificación empírica. También se esgrimía el inductivismo baconiano contra los racionalistas constructores de sistemas, los "dogmáticos modernos" que les llamaba Thomas Sprat. Un ejemplo de ello lo tenemos en el enfrentamiento entre Boyle y Thomas Hobbes. El programa experimental de Boyle y su esfuerzo por separar los "hechos" de las "hipótesis" fue atacado por Hobbes en razón de una supuesta debilidad metodológica. Al separarse de la ciencia, la filosofía iniciaba su propia degradación.

(L. A.)

Ideas aplicadas

Edgar W. Aust

Televisión: estudios de audiencia



EL AUDIOMETRO DE NIELSEN se programa con la edad y el sexo de cada miembro de la familia. Los espectadores introducen su código cuando empiezan a ver la tele; las visitas pueden también anotar su presencia. El aparato registra los canales sintonizados captando las frecuencias emitidas por la caja de empalmes, la TV o la grabadora de vídeo.

TODOS LOS DIAS, en unos 5000 hogares de EE.UU., los audiómetros recogen datos acerca de quiénes vieron qué, cuándo y durante cuánto tiempo.

DUNEDIN

FLORIDA

ESCALONADAMENTE durante la noche, todos los aparatos vierten, vía módem, sus registros de audiencia del día en el sistema del procesador central de la Nielsen instalado en Dunedin (Florida).

POR LA MAÑANA, la Nielsen ha ensamblado y procesado la muestra del comportamiento de la audiencia del país. Los ejecutivos de TV y otros suscriptores pueden conectarse a la red de datos de la Nielsen para saber qué programas de televisión tuvieron éxito y cuáles fracasaron.

SEMANALMENTE los suscriptores reciben un informe detallado con la crónica del número de espectadores domésticos que, cada cuarto de hora, estuvieron viendo la tele y de cómo le fue a cada programa frente a sus competidores.

Nielsen NATIONAL TV AUDIENCE ESTIMATES

ABC TV

CBS TV

En 1936, el ingeniero Arthur C. Nielsen, Sr., asistió en el Instituto de Tecnología de Massachusetts a la demostración de un dispositivo mecánico capaz de registrar la emisora a la que un radiorreceptor estuviera sintonizado en cualquier momento. Nielsen compró aquella técnica *in situ*. Seis años después, lanzaba su Radio-Indice Nielsen, que analizaba los hábitos de radioescucha de 800 hogares. Posteriormente, adaptó esa misma técnica al nuevo medio de la televisión, creando un sistema de estudios de audiencia que los canales emplean hoy para determinar la popularidad de sus programas.

En el transcurso de los años, la Nielsen Media Research ha empleado diversos procedimientos para reunir información acerca del visionado de programas, incluyendo encuestas y dietarios elaborados por voluntarios. En 1986 la compañía sustituyó los anteriores por un dispositivo llamado audiómetro. Este se encuentra actualmente conectado a los televisores y líneas telefónicas de unos 5000 domicilios de EE.UU.

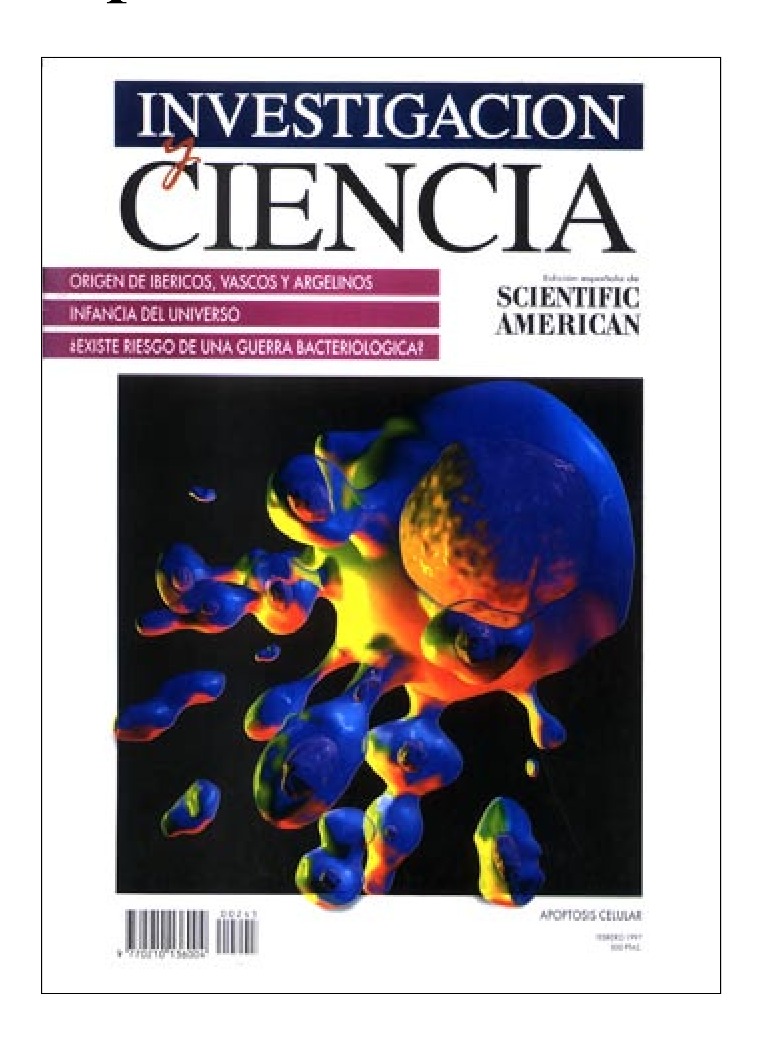
La Nielsen selecciona los domicilios a partir de una muestra estadísticamente representativa de la población televidente. Cada hogar recibe una compensación nominal por su cooperación. Estos colaboradores participan sólo durante dos años para que la muestra se mantenga representativa.

Cuando ven la tele, los voluntarios pulsan unos botones para revelar su presencia. El audiómetro registra entonces el sexo y la edad de cada espectador, así como el tiempo que pasan con cada canal. Cada noche, el dispositivo transmite los datos de cada domicilio al ordenador central de la Nielsen en Florida, el cual reúne la información en una base de datos preparada al efecto.

Para enfrentarse a las cambiantes necesidades de canales y patrocinadores, la técnica sigue evolucionando. En 1986, la Nielsen introdujo un sistema que emplea un dispositivo de reconocimiento de imágenes patrones para identificar cada programa comercial cuando se emite. Las futuras versiones del audiómetro, actualmente en desarrollo, captarán unos códigos intercalados en las señales de la TV digital. Asimismo, emplearán ordenadores de reconocimiento de imagen para identificar a los espectadores en cuanto se sienten en el sofá ante el televisor.

EDGAR W. AUST es vicepresidente de Nielsen Media Research.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



APOPTOSIS CELULAR, por Richard C. Duke, David M. Ojcius y John Ding-E. Young

Las células, a veces, se autodestruyen. Apoptosis es el término técnico con que se designa tal suicidio. Imprescindible en ocasiones para la salud del organismo, ese fenómeno podría ser responsable de muchas enfermedades.

LA VIDA DIARIA EN EL ANTIGUO EGIPTO, por Andrea G. McDowell

Hace unos 3000 años vivían obreros con sus familias en la aldea llamada hoy Deir el-Medina. Los testimonios escritos dejados por aquella comunidad extraordinariamente bien instruida nos ofrecen pinceladas fascinantes de su actividad cotidiana.

EL DEUTERIO Y LA GRAN EXPLOSION INICIAL, por Craig J. Hogan

Los núcleos de este isótopo del hidrógeno se formaron en los primeros momentos subsiguientes a la gran explosión. La concentración del mismo nos señala la evolución seguida por el universo primitivo y nos acerca a la naturaleza de la materia oscura cósmica.

ORIGEN DE IBERICOS, VASCOS Y ARGELINOS, por Antonio Arnáiz Villena y Jorge Martínez Laso

El origen y las relaciones entre poblaciones se han fundado por lo común en datos arqueológicos, culturales, lingüísticos y otros factores externos. El estudio directo de los genes permite proceder sobre bases más fiables.

LA CREACION DE MATERIALES NANOFASICOS, por Richard W. Siegel

Las propiedades de estas sustancias con granos ultrafinos, que encontramos ya en una amplia gama de productos comerciales, pueden diseñarse a la medida del usuario.

POLVO ATMOSFERICO Y LLUVIA ACIDA, por Lars O. Hedin y Gene E. Likens

Las emisiones de contaminantes ácidos del aire han decrecido espectacularmente. ¿Por qué la lluvia ácida sigue constituyendo un problema? El polvo atmosférico podría tener la respuesta.

UN GRILLO ROBOT, por Barbara Webb

¿Sería un sencillo sistema electromecánico capaz de reproducir la complejidad de la conducta de un organismo vivo? Había una forma segura de averiguarlo.

LA AMENAZA DE LAS ARMAS BIOLOGICAS, por Leonard A. Cole

Los estados y los terroristas muestran un redoblado interés por las armas bacteriológicas. Ante esa situación, se impone diseñar una eficaz estrategia disuasoria.

